INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LAS DOS MITADES DE NUESTRO CEREBRO

EL PENDULO DE FOUCAULT

INFORME ESPECIAL: PANORAMICA ACTUAL DEL SIDA

EL ARTE DE LA SEDUCCION



SEPTIEMBRE 1998
800 PTAS.



Septiembre de 1998 Número 264



SECCIONES



Portada: Dan Wagner

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Servicio Geológico de EE.UU. y NASA/Laboratorio de Propulsión a Chorro; Simulación solar de Laurie Grace
6-9	NASA/Lab. de Propulsión a Chorro
10	Servicio Geológico de EE.UU.
11	Tom Moore
12-13	NASA/Lab. de Propulsión a Chorro (*arriba*), Lisa Burnett *(recuadro)*
14-15	John W. Karapelou
16	Laurie Grace
17	John W. Karapelou, Michael B. Miller (*inserto*)
18	Laurie Grace
20	Mark Gerber
21	Sam Ogden
22-23	Mark Gerber
24	UPI/CORBIS-BETTMANN (*izquierda*), Mark Gerber (*derecha*)
32-33	Robert Hunt
34-35	Slim Films (*arriba*) y Observatorio de París (*abajo*)
36	William Tobin; STUDIO CNAM, Museo de las Artes y Oficios de París; Institución Smithsoniana y Astronomía Popular (*de arriba abajo y de izquierda a derecha*)
37	Slim Films
38-39	William Tobin
41	Space Telescope Institute
42	P. André, R. Bachiller y F. Martín Vicente
43	IRAM
44	R. Bachiller y M. Pérez
45	F. Gueth
46	A Dutrey (*arriba*), Space Telescope Institute (*abajo*)
47	F. Martín Vicente
48	F. Gueth
49	F. Martín Vicente
50-51	Bill Beatty/*Animals Animals*
52	Orley R. "Chip" Taylor, Jr.
53	Ronald L. Rutowski
54	Patricia J. Wynne (*arriba* y *abajo a la izquierda*); Thomas Eisner, (*centro*) y Ronald L. Rutowski (*abajo, derecha*)
55	Ronald L. Rutowski
57	L. E. Henderson y L. O. Arthur
58-59	Laurie Grace
60-61	Tomo Narashima
62	Bryan Christie
63	Slim Films
64	Dana Burns-Pizer
65	Robert Siliciano
66	Dana Burns-Pizer
67	Bryan Christie
69	Laurie Grace
70	Jeff Scheid
72-74	Tomo Narashima
75	Slim Films
76	Tomo Narashima
77	Fred Whitehead/*Animals Animals*
79	Marilyn Humphries, *Impact Visuals*
80	Slim Films
82	John Chiasson
83	Slim Films
84	David Guttenfelder

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Mónica Murphy: *La exploración de Marte*; Meritxell Torras García: *Dos cerebros en uno*; Julio A. Alonso: *El láser monoatómico*; Xavier Bellés: *El ejercicio de la seducción por las mariposas*; Xavier Roqué Rodríguez: *Léon Foucault*; Angel Garcimartín: *Panorámica del sida en 1998* y *Nunca es demasiado tarde*; Ana M.ª Rubio: *Progresos terapéuticos*; Victoria Laporta: *Resistencia a los medicamentos*; José M. García de la Mora: *El sida infantil* y *Dilemas éticos*; Luis Bou: *Medidas preventivas* y *Juegos matemáticos*; Joandomènec Ros: *Vacunas contra el VIH: dificultades y perspectivas*; J. Vilardell: *Hace...* e *Ideas aplicadas*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; Carol Ezzell; W. Wayt Gibbs; Alden M. Hayashi; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider; y Glenn Zorpette; Mark Alpert, Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
PUBLISHER Joachim P. Rosler
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.150	20.700

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 91 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

Aparece el transistor. «Durante los últimos meses un grupo de físicos de los Laboratorios Bell Telephone ha hecho un descubrimiento a la vez sencillo y trascendente. En esencia se trata de un procedimiento para regular el movimiento de los electrones en el seno de un cristal sólido y no en el vacío. Tal hallazgo ha producido un dispositivo llamado transistor (así bautizado porque transfiere señales eléctricas a través de una resistencia). El transistor no es sólo diminuto, sino que consume tan poca potencia y la emplea con tal rendimiento (el 25 % como amplificador de radio, frente al 10 % de una lámpara de vacío) que es posible reducir el tamaño de las baterías necesarias para alimentar los aparatos portátiles. Combinado con los circuitos impresos podría abrir unos campos completamente nuevos a la electrónica.»

Asistencia primaria. «Los hechiceros primitivos aprendieron hace mucho, mucho tiempo lo que la medicina moderna está volviendo a descubrir ahora, que las distinciones entre la mente y el cuerpo son artificiales. Los médicos primitivos comprendían perfectamente la naturaleza de las enfermedades psicógenas. Entre los pueblos analfabetos, como en las sociedades más civilizadas, los trastornos emocionales se traducen fácilmente en síntomas neuróticos. Nuestra ilustración muestra un pintura sobre arena realizada por un hechicero de los indios navajos, ideada para tratar la mente y el cuerpo en una ceremonia de curación. El dibujo está hecho en el suelo de una cabaña, tendiéndose al paciente sobre él para luego frotarle con pintura.»

...cien años

Sobre la evolución. «El profesor Ernst Haeckel leyó una fascinante comunicación sobre la ascendencia humana en el Congreso de Zoología de Cambridge. Afirma sin dudarlo que la ciencia ya ha establecido definitivamente la certeza de que el hombre desciende de formas inferiores de vida a través de distintas etapas evolutivas ocurridas durante un período de mil millones de años. ‘El hecho más importante es que el hombre es un primate, y que todos los primates (lémures, monos, simios antropoides y hombre) descienden de un tronco común. Considerando lo que pasará en el siglo XX, estoy convencido de que nuestra teoría de la ascendencia humana será aceptada universalmente’.»

No hacían falta transistores. «El señor José Bach describe en *L'Illustration* un instrumento mediante el cual los indios brasileños se comunican entre ellos a distancia. En cada malocca, o vivienda, hay una cambarisa, una especie de tambor de madera enterrado en arena hasta media altura. Cuando se le golpea con un mazo de madera, el sonido se percibe nítidamente en las maloccas vecinas. Los golpes apenas son audibles fuera de las casas, por lo que parece seguro que el sonido se transmite por tierra, descansando sin duda los tambores sobre el mismo estrato rocoso.»



Pintura sobre arena para una ceremonia de curación

...ciento cincuenta años

¡Oro! «Nos llegan noticias de California del descubrimiento de un inmenso yacimiento de oro de ciento cincuenta kilómetros de extensión, cerca de Monterrey. Se extrae lavando la arena del río en una vasija, que puede ser desde un platillo de té a un calentador de cama. Un sola persona puede reunir una onza o dos diarias, y a veces hasta un valor de cien dólares. En la zona hay dos mil blancos y el mismo número de indios. Todos los asentamientos americanos están abandonados y las labores del campo casi paralizadas. Sólo las mujeres permanecen en los poblados. Marineros y oficiales abandonan sus puestos en los barcos para dirigirse hacia la región del oro.» [*Nota de la Redacción: El descubrimiento de Sutter's Mill desencadenó la fiebre del oro californiana de 1848-1849*.]

Teoría de los fósiles. «Las rocas fosilíferas de los estratos sedimentarios nos presentan diferentes objetos de épocas pasadas, siendo asombrosos los objetos diminutos y delicados que han llegado hasta nosotros: huellas de pisadas en arena húmeda; alimentos no digeridos; incluso el saco de tinta de la sepia ha sido hallado en tan perfecto estado que la misma sustancia que el animal empleó hace siglos, o más bien hace miles de años, para protegerse de sus enemigos ha servido como color para dibujarlo
—Alexander Humbolt.»

La exploración de Marte

El vehículo Pathfinder *recorrió por vez primera la superficie de Marte. Según los datos que obtuvo* in situ, *puede que hace tiempo hubiese vida en el planeta rojo*

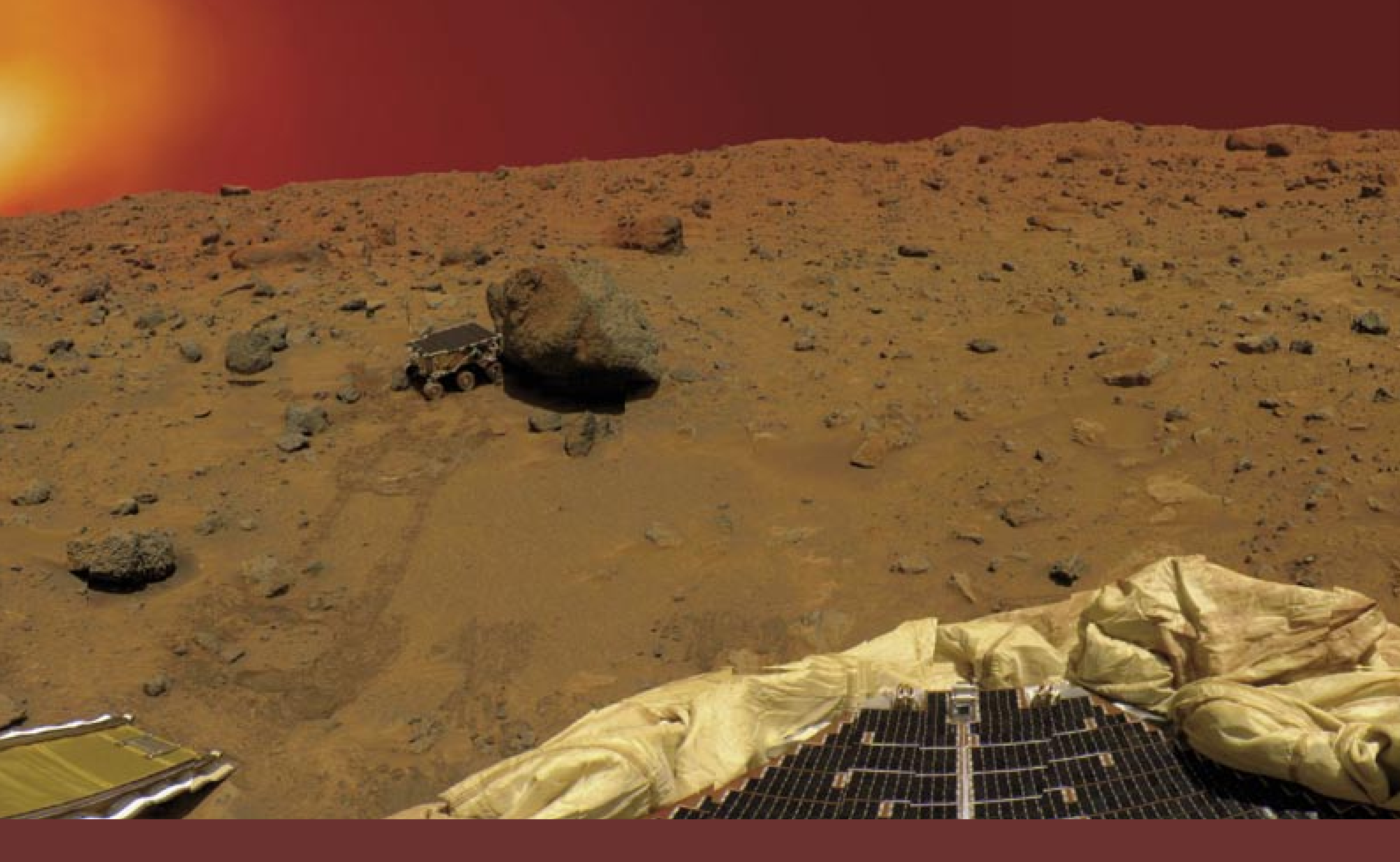
Matthew P. Golombek

"Rocas, rocas, mirad esas rocas", exclamé en voz alta a todos los que estábamos reunidos en la sala de control del *Mars Pathfinder* cerca de las 16:30 horas del 4 de julio de 1997. El *Pathfinder* nos enviaba las primeras imágenes de la superficie de Marte mientras nuestras miradas permanecían fijas sobre las pantallas de televisión. Fuimos a Marte para estudiar las rocas, pero lo que nadie sabía a ciencia cierta era si encontraríamos alguna, ya que el lugar elegido para el aterrizaje se seleccionó sobre la base de imágenes orbitales cuya resolución era de un kilómetro aproximadamente. El *Pathfinder* podría haber ido a caer sobre un terreno llano y carente de rocas. La primera conexión por radio indicaba que la sonda estaba en posición casi horizontal, cosa que resultó preocupante para los que estábamos interesados en analizar



las rocas, puesto que la mayoría de los presentes sostenía que una superficie rocosa haría que la sonda estuviera en posición inclinada. Las primeras imágenes no mostraron más que la propia sonda, por lo que seguíamos sin saber en qué circunstancias se encontraba. Tuvieron que pasar unos cuantos minutos de enorme tensión hasta que las primeras imágenes de la superficie nos presentaron el terreno rocoso que esperábamos (*véase la figura 2*).

¿Por qué nos interesaba tanto encontrar rocas? Cada roca lleva grabado, en los minerales que la componen, el mensaje sobre la historia de su formación, motivo por el que confiábamos en que nos proporcionarían indicios sobre el medio ambiente marciano en sus orígenes. La carga útil del *Pathfinder*, que consistía de una sonda principal equipada con una cámara multiespectro y un vehículo todo terreno móvil provisto de un analizador químico, se proyectó especialmente para estudiar las formaciones rocosas. Aunque no pudiera identificar los minerales de forma directa —el analizador no medía más que los elementos químicos constituyentes—, nuestro plan consistía en identificarlos de forma indirecta, por su composición elemental y las formas, texturas y colores que tuvieran. El aterrizaje del *Pathfinder* en la entrada de un gigantesco barranco —por el que antaño fluyó una enorme cantidad de agua— nos permitió la búsqueda de rocas que en teoría habrían sido transportadas desde las tierras altas, donde aún perduran cráteres antiquísimos. Estas piedras nos podrían dar pistas sobre el clima que reinaba en Marte hace mucho tiempo y permitirnos averiguar si las condiciones fueron alguna vez propicias para el desarrollo de la vida (*véase la figura 5*).



1. EL CREPUSCULO EN EL VALLE DE ARES, lugar donde se produjo el aterrizaje del *Pathfinder*, se evoca en esta visión panorámica, una composición que recoge una puesta de sol real (*inserto de la izquierda*) y otras imágenes. El vehículo todo terreno está analizando la roca Yogui, situada a la derecha de la rampa posterior de la sonda. Hacia la derecha se encuentran las zonas de tierra rosa claro conocidas como Scooby Doo (*las más cercanas a la sonda*) y “Baker’s Bench”. El vehículo móvil intentó arañar la superficie de Scooby Doo sin éxito, lo que indica que la tierra está allí completamente solidificada. La rocalla, harto estudiada, se encuentra a la izquierda del centro. La roca achatada que aparece en la zona anterior a la rocalla está cubierta de polvo, pero las caras más empinadas de las rocas mayores están impolutas; el vehículo las analizó todas. (En esta simulación se manipularon por ordenador partes del cielo y del terreno para completar la imagen. Durante un crepúsculo real, las sombras tendrían una mayor amplitud y la superficie sería más oscura.)

2. LAS PRIMERAS IMAGENES del *Mars Pathfinder* se ensamblaron y ofrecieron esta visión panorámica de rocas oscuras, polvo rojo y un cielo mostaza. Muchas rocas, especialmente las que configuran la rocalla (*centro*), yacen apiladas e inclinadas, señal de que fueron depositadas por rápidos torrentes de agua. Un kilómetro más allá de la rocalla, hacia el horizonte oeste-suroeste, encontramos los picos gemelos, que sirvieron para identificar el lugar de aterrizaje en las imágenes del *Viking*. Al día siguiente de la toma de tierra, la sonda retiró la cubierta neumática protectora y desplegó dos rampas; el vehículo móvil descendió por la rampa trasera para iniciar su estudio de la superficie. (*Los pequeños trazos de color verde y rojo son artefactos debidos a la compresión de los datos.*)



3. ESTA ROCA, cincelada por la arena y bautizada Moe, se parece a las rocas terrestres conocidas como ventifactos. La textura estriada se produce a medida que las partículas de arena arrastradas por el viento erosionan las piedras que encuentran en su camino. La arena terrestre resulta de la disgregación de las rocas por el agua. Los canales que aparecen en la faz de Moe apuntan, sin excepción alguna, en dirección al sudoeste, prácticamente la misma orientación que los senderos causados por el viento perceptibles en otros puntos de la misma zona.

El requisito indispensable para que exista vida en la Tierra (la única forma de vida que conocemos) es la presencia de agua en estado líquido. El agua líquida no es estable en las condiciones que actualmente reinan en Marte. Como la temperatura y la presión son sumamente bajas, no hay agua más que en forma de hielo o de vapor; la fase líquida no duraría más que el breve período de tiempo necesario para congelarse o vaporizarse. Sin embargo, las imágenes tomadas por el *Viking* dos decenios atrás muestran la existencia de barrancos de drenaje y ofrecen pruebas de que existieron lagos en las zonas más elevadas. Estas características apuntan a que Marte fuese en un pasado remoto más cálido y húmedo, de modo que pudiera existir agua sobre su superficie [*véase* "Cambio climático global en Marte", por Jeffrey S. Kargel y Robert G. Strom; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1997]. También se han propuesto otras posibilidades, como serían los procesos de supuración causados por el calentamiento geotérmico de un medio frígido y seco. Una de las metas científicas del *Pathfinder* fue la búsqueda de indicios que probaran que Marte había sido cálido y húmedo con anterioridad.

Los posibles cauces de antiguos lagos se encuentran en terrenos que, a juzgar por la densidad de cráteres de impacto, tienen la misma edad aproximadamente que las rocas más antiguas que encontramos en la Tierra, en las que se encuentran pruebas claras de vida que data entre 3,9 y 3,6 miles de millones de años.

MATTHEW P. GOLOMBEK, investigador del proyecto *Mars Pathfinder*, es responsable de todos los aspectos científicos generales de la misión. Trabaja en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, California. Es presidente del grupo científico del proyecto *Pathfinder*, vicepresidente del equipo de operaciones del experimento y miembro del grupo de gestión del proyecto. Ha escrito numerosos artículos sobre la nave y los resultados obtenidos y ha organizado ruedas de prensa y reuniones científicas. Su actividad investigadora se centra en la estructura geológica y la tectónica de la Tierra y de otros planetas, sobre todo Marte. Se interesó por la geología porque quería conocer el origen de las montañas y los valles que pueblan la Tierra.

Si la vida pudo desarrollarse en la Tierra por esa época, ¿por qué no habría de surgir también en Marte, dada la similitud de las condiciones reinantes en ambos planetas? Esto es lo que hace que la investigación de Marte sea tan importante. La exploración de nuestro planeta vecino puede ayudarnos a encontrar respuesta a algunos de los interrogantes más significativos de la ciencia: ¿estamos solos en el universo? ¿Podrá surgir la vida en cualquier lugar donde el agua líquida sea estable? o, por el contrario, ¿se requiere algún otro elemento adicional? Si la vida llegó efectivamente a desarrollarse en Marte, ¿qué ha sido de ella? Y si nunca la hubo, ¿cuál fue la causa?

"Pathfinding", buscando caminos

El *Pathfinder* fue una misión de tipo "*Discovery*" —que es como la Administración estadounidense NASA denomina a sus misiones "buenas, bonitas y más baratas"— diseñada para demostrar la existencia de una alternativa de bajo coste que permitiese el aterrizaje en Marte de una pequeña carga útil y de un vehículo móvil. El desarrollo, el lanzamiento y la operación de la misión se llevaron a cabo con un presupuesto fijo comparable al de una gran producción cinematográfica (entre 200 y 300 millones de dólares), lo que no representa más que una pequeña parte del monto total que se asigna normalmente a una misión espacial. Construido y lanzado en un tiempo sumamente corto (tres años y medio), el *Pathfinder* incluía tres instrumentos científicos: el detector de imagen del *Mars Pathfinder*, el espectrómetro de rayos X Alfa Protón y el instrumento destinado a la estructura atmosférica y a la metrología. El vehículo también actuaba como un instrumento más; se le utilizó para realizar diez experimentos técnicos destinados a estudiar la abrasión de películas de metal en las ruedas del todo terreno, la adherencia del polvo a las células solares y las reacciones del equipo a su entorno.

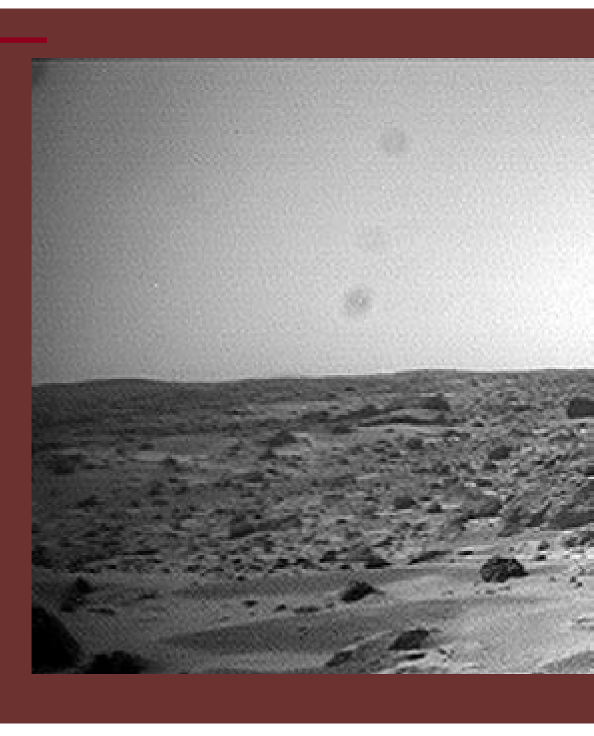
Por poner una comparación, la misión orbital *Viking*, que incluía dos pares de sondas orbitales, se efectuó hace más de veinte años con un coste unas veinte veces superior. *Viking* tuvo un enorme éxito y recogió más de 57.000 imágenes, que los investigadores llevan estudiando desde entonces. Las sondas llevaban a bordo elaborados instrumentos que realizaron pruebas para detectar la presencia de organismos en dos emplazamientos diferentes, pero no se encontró nada.

La parte más difícil de la misión *Pathfinder* consistía en los cinco minutos durante los cuales la nave tuvo que pasar de la relativa calma del crucero interplanetario a las tensiones de su entrada en la atmósfera, el descenso y el aterrizaje (*véase la figura 7*). En tan corto espacio de tiempo tenían que efectuarse con precisión más de cincuenta operaciones decisivas para que la nave consiguiera tomar tierra correctamente. Unos treinta minutos antes de su entrada en la atmósfera, una de las piezas de la nave se separó del resto de la sonda. Cuando se encontraba a 130 kilómetros por encima de la superficie, la nave entró en la atmósfera protegida por una coraza aérea. Un paracaídas se abría 134 segundos antes del aterrizaje, momento en el que salía despedida la coraza. La sonda colgaba durante el descenso de un cable de veinte metros de longitud.

A medida que el *Pathfinder* se aproximaba a la superficie, su radar-altímetro se encargó de disparar tres pequeños cohetes para reducir aún más su marcha. A cada lado de la sonda tetraédrica se dispararon enormes colchones neumáticos y, mientras se seccionaba el cable, la sonda entró en contacto con la superficie marciana —dando algún que otro bote— a una velocidad de 50 kilómetros por hora. Las medidas del acelerómetro indican que rebotó al menos quince veces sin que los colchones neumáticos perdieran presión. Después de dar varias vueltas, se detuvo completamente, se desinflaron los colchones y la sonda quedó al descubierto para iniciar las operaciones en la superficie.

Aunque el objetivo principal del *Pathfinder* era demostrar la efectividad de esta novedosa secuencia de aterrizaje, el resto de la misión también cumplió con las expectativas. La sonda sobrevivió durante un espacio de tiempo tres veces superior a lo esperado y el vehículo todo terreno doce veces más. La misión proporcionó 2,3 miles de millones de bits de información sobre Marte, incluyendo más de 16.500 imágenes tomadas por la sonda, 550 por el vehículo móvil y más o menos ocho mil millones y medio de medidas de temperatura, presión y viento. El todo terreno anduvo cien metros en total, realizando 230 maniobras, gracias a lo que cubrió un total de

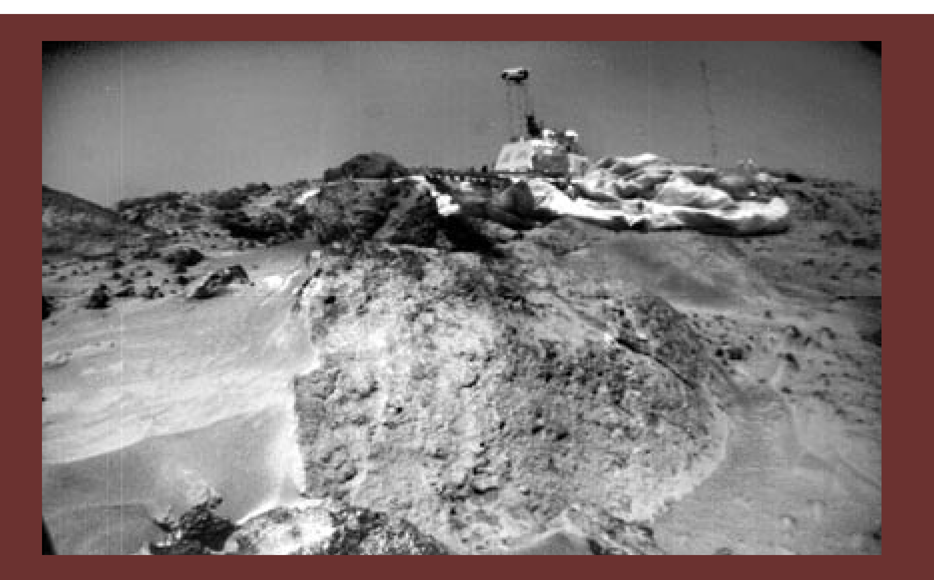
200 metros cuadrados de superficie. Obtuvo 16 análisis químicos de rocas y tierra, realizó experimentos de mecánica del suelo y completó con éxito numerosos experimentos técnicos. También logró captar la imaginación del público, copando los titulares de la prensa durante una semana, convirtiéndose en el mayor acontecimiento seguido por Internet en toda la historia, con un total de 566 millones de conexiones durante el primer mes de la misión (el 8 de julio ya llevaba 47 millones de consultas).



4. LAS DUNAS DE ARENA constituyen pruebas incidentales que refuerzan la hipótesis de un pasado más húmedo. Estas dunas, situadas en la depresión que se encuentra detrás de la rocalla, se formaron cuando la arena, arrastrada por el viento, superó el montículo que antecede a la cresta de la duna, cayendo en cascada por el lado más inclinado (que en esta imagen está situado en dirección opuesta al vehículo). Las observaciones realizadas en órbita muestran dunas de dimensiones superiores, pero ninguna se encuentra cerca del emplazamiento del *Pathfinder*. El hallazgo de estas dunas más pequeñas indica que la arena abunda más en Marte de lo que se había sospechado. La formación de arena en la Tierra se debe principalmente a los movimientos del agua.

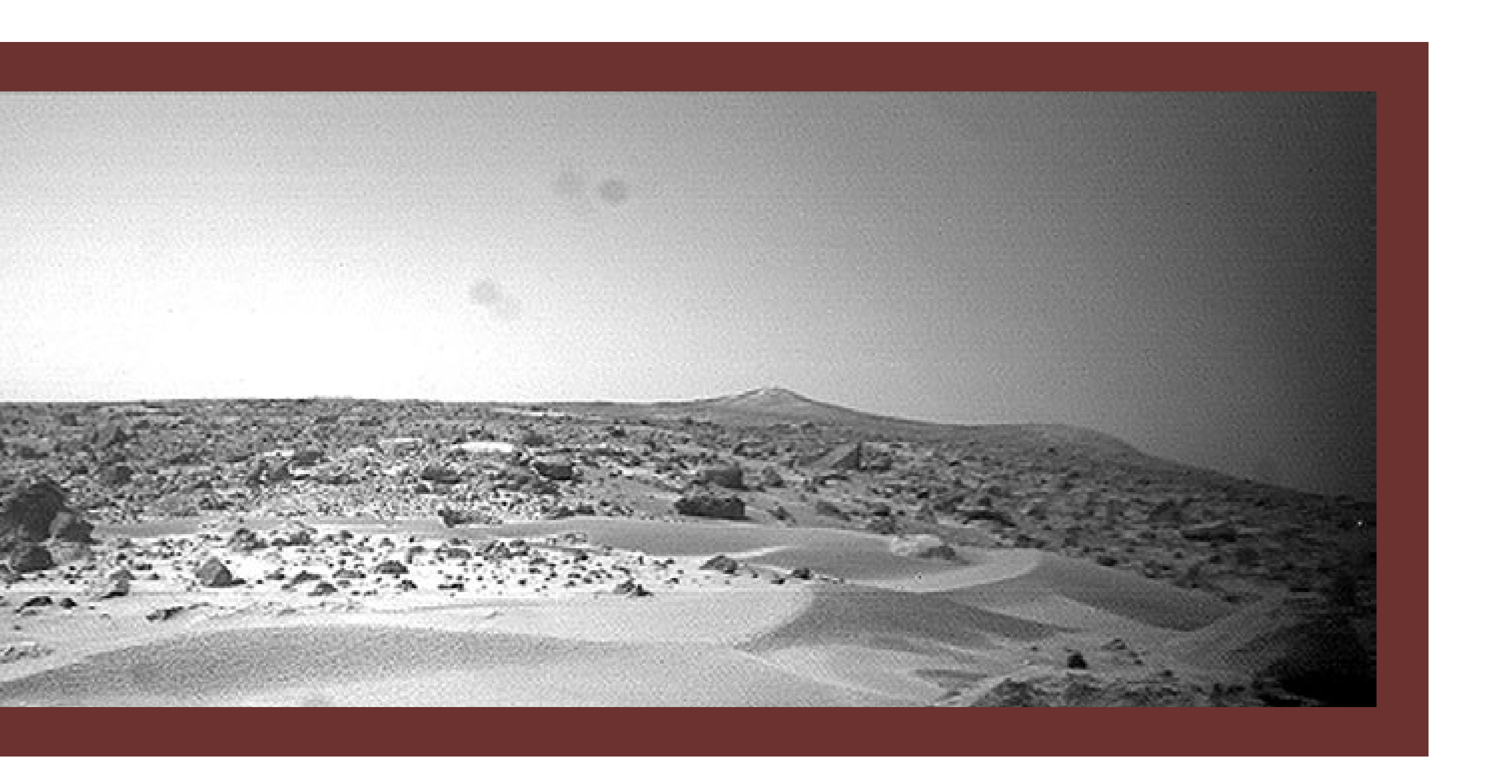
Etapa de inundaciones

El mosaico de los parajes marcianos que se elaboró a partir de las primeras imágenes, reveló una llanura pedregosa (cuyo veinte por ciento aproximadamente está cubierto de rocas), que parece haberse formado como consecuencia de inundaciones de carácter catastrófico (*véase la figura 2*). Esta hipótesis coincide con nuestras predicciones, realizadas según la información recogida por detectores que operaban por control remoto y la localización precisa del lugar de aterrizaje (19,13 grados norte y 33,22 grados oeste), corriente abajo desde la boca del Valle de Ares en la zona baja conocida como "*Chryse Planitia*". En las imágenes tomadas por el *Viking*, la zona se asemejaba a una localidad situada al este del centro del estado de Washington y conocida como *Channeled Scabland*, una formación geológica causada por inundaciones de glaciares en el Pleistoceno. Esta analogía sugiere que el Valle de Ares se formó cuando un volumen de agua más o menos igual que el contenido en los Grandes Lagos (es decir, cientos de kilómetros cúbicos) quedó liberado en forma de caudales imparables, esculpiendo en pocas semanas el canal observado. La densidad de los cráteres de impacto que se aprecia en la zona indica que se formó en una época intermedia de la historia de Marte, en algún momento situado entre los 1,8 y los 3,5 mil millones de años.



5. UN POSIBLE CONGLOMERADO ROCOSO podría ser la mejor prueba de que Marte fue antaño cálido y húmedo. La roca, conocida como "*Ender*", presenta hoyos y piedras incrustadas. Rocas como ésta podrían ser conglomerados, piedras que, para formarse, necesitan estar en contacto con agua en movimiento. La sonda puede verse al fondo de la imagen; la antena reticulada sostiene una cámara y la antena de la derecha contiene los sensores meteorológicos.

Las imágenes del *Pathfinder* apoyan esta interpretación, ya que muestran guijarros redondeados y cantos rodados semejantes a los que se depositan tras las inundaciones de gran calibre. Las piedras situadas en la zona que denominamos "rocalla", un conjunto de rocas situadas al sudoeste de la sonda y que apodamos con los nombres Tiburón, "media cúpula" y Moe, están inclinadas y apiladas, como si hubieran sido depositadas por grandes torrentes de agua. Las mayores rocas que aparecen en las imágenes (de medio metro y más) suelen ser achatadas y están situadas en posiciones elevadas, lo que parece coherente con la hipótesis de deposición por inundación. Los "picos gemelos" —un par de colinas que aparecen en el horizonte al sudoeste— son aerodinámicos. Las imágenes del *Viking* indican que la



sonda está posada en el costado de un suave acantilado que se extiende al nordeste desde los "picos gemelos"; este acantilado podría ser una cola de restos depositados como consecuencia de la formación de esas colinas. Los pequeños canales que aparecen por doquier se asemejan a los que se aprecian en el *Channeled Scabland*, donde el desagüe que tuvo lugar en la última etapa de la inundación arrastró los materiales formados por los granos más finos.

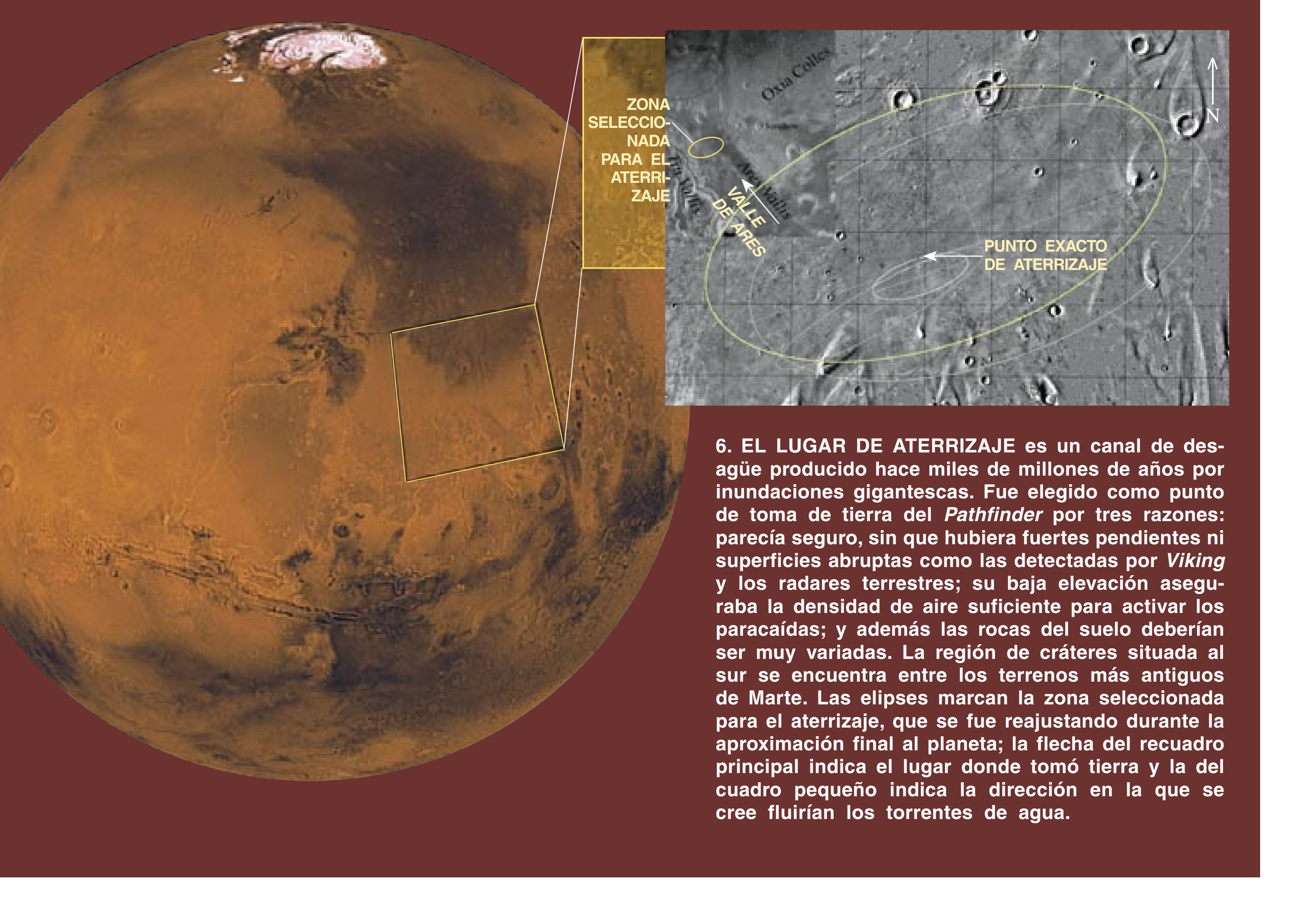
Las piedras que se observan en esta zona presentan una coloración gris oscura y están recubiertas de cantidades variables de polvo de color mostaza. Este polvo parece ser el mismo material que se observa en la atmósfera, cuyos granos son extremadamente finos, de tan sólo una micra (como muestran las imágenes tomadas a través de varios filtros y en distintos puntos del cielo). El polvo también está acumulado tras las rocas, formando montones alargados producidos por el viento.

Algunas de las rocas, que tienen un aspecto acanalado y estriado, presentan signos de erosión causada presumiblemente por finas partículas, que el viento arrastraría por la superficie y cuyo tamaño (menor de un milímetro) no superaría el de un grano de arena (*véase la figura 3*). La cámara del todo terreno también captó imágenes de las dunas de arena situadas en la depresión que se encuentra más allá de la rocalla (*véase la figura 4*). La tierra recubre varios centímetros de la parte inferior de las piedras, lo que parece indicar que hubieran sido desenterradas por el viento. Pese a estos signos de lenta erosión por el viento, ni las rocas ni la superficie parecen haber cambiado mucho desde la época de la inundación.

¿Existen rocas sedimentarias en Marte?

El espectrómetro de rayos X Alfa Protón, situado a bordo del todo terreno, midió la composición de ocho rocas. El contenido de silicio de alguna de ellas es muy superior a la de los meteoritos marcianos que constituyen las únicas muestras adicionales disponibles de Marte. Estos meteoritos se denominan rocas ígneas máficas, piedras volcánicas con un contenido en silicio relativamente bajo, pero con elevadas dosis de hierro y magnesio. Tales rocas se forman cuando el manto superior de un planeta se funde. El líquido fundido asciende a través de la corteza y se solidifica sobre la superficie o muy cerca de ella. Este tipo de rocas —denominadas generalmente basaltos— es el más común de la Tierra y también se ha encontrado en la Luna. Dada la composición de los meteoritos marcianos y la presencia de llanuras y montañas parecidas a las formaciones producidas por el vulcanismo basáltico terrestre, los geólogos esperaban encontrar basaltos en Marte.

Pero las rocas analizadas por el *Pathfinder* no son basaltos. Si son volcánicas, como parece indicar la textura vesicular de su superficie, seguramente se formaron cuando los gases atrapados durante el proceso de enfriamiento produjeron pequeños agujeros en la piedra, y su contenido de silicio las clasifica como andesitas. Se forman cuando el líquido fundido basáltico de la superficie se introduce bajo la corteza, sumergiéndose hasta alcanzar grandes profundidades. Se forman cristales con abundancia de hierro y magnesio, que se sumergen, dejando tras de sí un líquido fundido sumamente rico en silicio, que sigue su camino hasta hacer erupción sobre la superficie. Las andesitas constituyeron una gran sorpresa, pero como desconocemos su procedencia y el porqué de su presencia en la superficie marciana, no sabemos a ciencia cierta cuáles sean las verdaderas implicaciones de este descubrimiento. Si las andesitas fuesen representativas de las zonas altas, su presencia indicaría que la antigua corteza de Marte tendría una composición parecida a la corteza continental de la Tierra, similitud que sería difícil de reconciliar con las historias geológicas tan dispares de ambos planetas. Otra posibilidad es que las rocas no representen más que una pequeña porción de rocas silíceas en una llanura fundamentalmente basáltica.



6. EL LUGAR DE ATERRIZAJE es un canal de desagüe producido hace miles de millones de años por inundaciones gigantescas. Fue elegido como punto de toma de tierra del *Pathfinder* por tres razones: parecía seguro, sin que hubiera fuertes pendientes ni superficies abruptas como las detectadas por *Viking* y los radares terrestres; su baja elevación aseguraba la densidad de aire suficiente para activar los paracaídas; y además las rocas del suelo deberían ser muy variadas. La región de cráteres situada al sur se encuentra entre los terrenos más antiguos de Marte. Las elipses marcan la zona seleccionada para el aterrizaje, que se fue reajustando durante la aproximación final al planeta; la flecha del recuadro principal indica el lugar donde tomó tierra y la del cuadro pequeño indica la dirección en la que se cree fluirían los torrentes de agua.

Resulta muy sorprendente que no todas las piedras parezcan ser volcánicas. Algunas presentan capas como las de las rocas sedimentarias terrestres, que se forman por deposición de fragmentos más pequeños de roca en el agua. Las imágenes del todo terreno muestran que la superficie está repleta de numerosos guijarros redondeados. También se observan rocas algo mayores que parecen tener piedras más pequeñas incrustadas en su superficie (*véase la figura 5*) y pequeñas muescas brillantes (como si los fragmentos que quedaron incrustados durante su formación se hubiesen desprendido, dejando huecos). Estas rocas podrían ser conglomerados formados por torrentes de agua. El agua sería la responsable de la forma redondeada de los guijarros y los habría depositado en una matriz de arena y arcilla, matriz que posteriormente sufriría un proceso de compresión, formando así una roca que vendría transportada a su posición actual por las inundaciones. Debido a que los conglomerados se forman durante largos períodos de tiempo, si estas rocas marcianas fueran conglomerados reforzarían la hipótesis de que el agua en estado líquido fue estable en alguna época y que el clima marciano tuviese que ser, en consecuencia, más templado y húmedo que el actual.

Las muestras de tierra recogidas en la zona del aterrizaje son muy variadas: desde un polvo con coloraciones de diversa tonalidad —desde el rojo brillante al rojo oscuro— a materiales de color gris oscuro. El contenido de silicio de los suelos es, en general, inferior al de las rocas, mientras que tienen más azufre, hierro y magnesio. La composición de la tierra es generalmente igual a la que se midió en las zonas examinadas por el *Viking*, situadas en hemisferios opuestos (*Viking* 1 se situó a 800 kilómetros al oeste de *Pathfinder*; *Viking* 2 a miles de kilómetros de distancia en la cara opuesta, al este del hemisferio norte). Parece, por lo tanto, que la deposición de estos suelos se realizó de la misma manera en todo el planeta. La semejanza de sus composiciones implica que los distintos colores pudieran ser el resultado de ligeras variaciones del contenido de hierro o del tamaño y forma de las partículas (*véase la figura 9*).

Parte del lugar de aterrizaje estaba recubierto por materiales de color rosa o rojo vivo. Aunque parecidos a las otras muestras en cuanto a composición se refiere, parecían haber sufrido un proceso de induración o de cementación, puesto que su superficie no se alteró con el paso de las ruedas del todo terreno.

El *Pathfinder* también investigó el polvo presente en la atmósfera de Marte mediante observaciones de su deposición sobre una serie de objetivos magnéticos dispuestos en la nave. Resultó que el polvo es magnético en grado sumo. Podría estar compuesto de pequeñas partículas de silicato —arcilla quizá— ligadas por un mineral muy magnético al que se denomina maghemita. Este dato también sería consistente con un pasado acuoso del planeta. El hierro podría haberse disuelto de los materiales de la corteza presentes en el agua, mientras que la maghemita sería un precipitado seco por congelación.

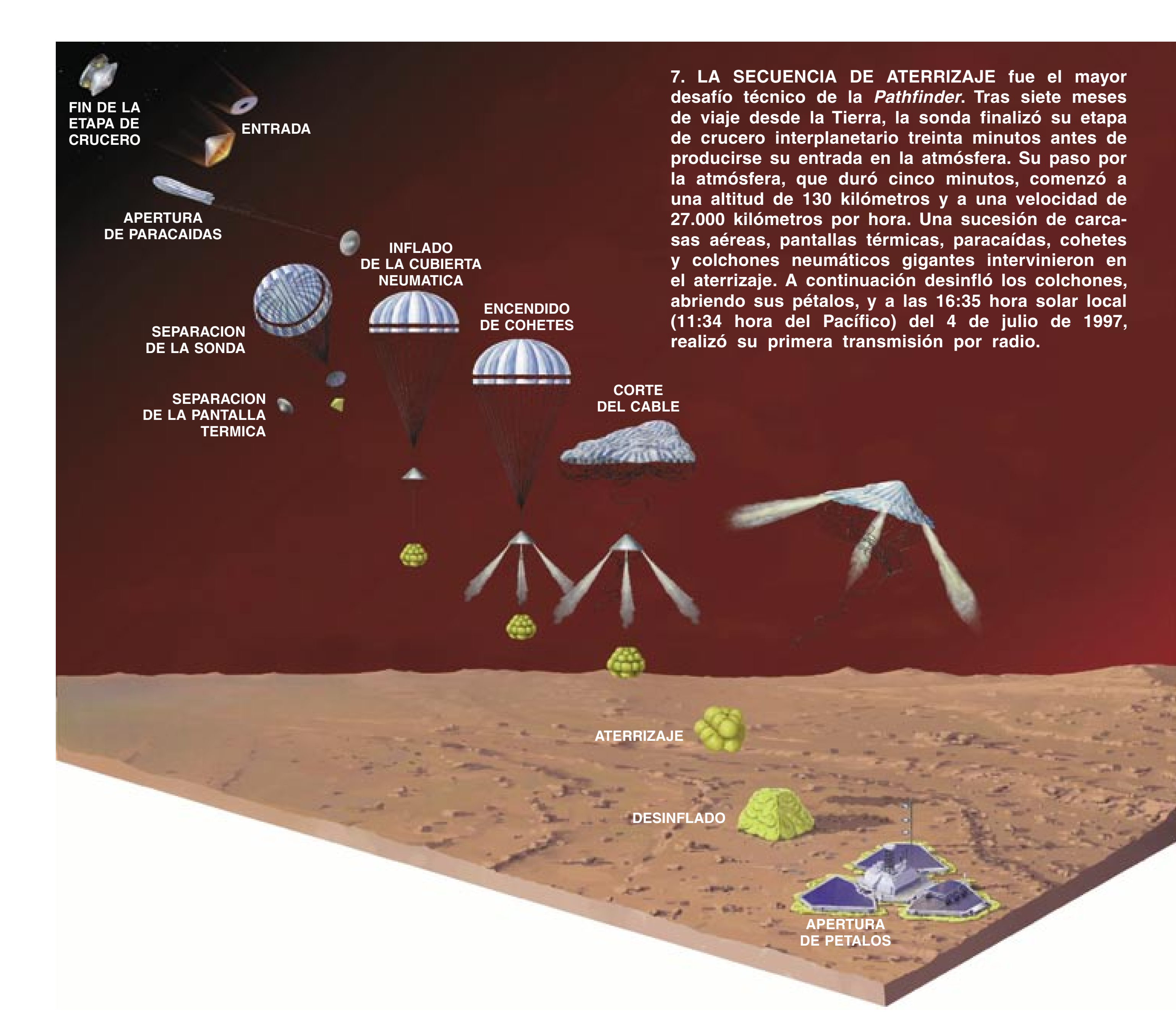
El cielo de Marte mostró el mismo color mostaza que revelaron las imágenes del *Viking*, tonalidad que se explica por la presencia de finos granos de polvo que se encuentran

suspendidos en la atmósfera. Las imágenes del Telescopio Espacial Hubble habían hecho pensar en una atmósfera clara y nítida; hubo quien hasta llegó a imaginar que se vería de color azul desde la superficie del planeta. Pero el *Pathfinder* descubriría algo bien distinto, lo que indica que o bien la atmósfera, alimentada por tormentas locales de polvo, contiene polvo de forma permanente, o bien que la opacidad atmosférica registra variaciones apreciables durante cortos espacios de tiempo. El tamaño de las partículas de polvo (aproximadamente una micra) y la cantidad de vapor de agua (equivalente a tan sólo una centésima de milímetro de precipitación) calculados son consistentes con las medidas realizadas por el *Viking*. Aunque Marte tuviera un aspecto exuberante en algún tiempo pasado, actualmente es más seco y polvoriento que cualquiera de los desiertos de la Tierra.

Aire helado

Los sensores meteorológicos proporcionaron informaciones adicionales sobre la atmósfera. Encontraron pautas diurnas y más amplias en las fluctuaciones de temperatura y de presión. La temperatura alcanzó un máximo de 263 grados kelvin (–10 ºC) todos los días a las 14:00 de la hora local solar, y un mínimo de 197 grados kelvin (–76 ºC) justo antes del amanecer. El mínimo de presión, de sólo 6,7 milibares, cerca del 0,67 por ciento de la presión terrestre a nivel del mar, se alcanzó en sol 20, el vigésimo día marciano después del aterrizaje. La presión del aire varía según las estaciones: durante el invierno hace tanto frío que entre el veinte y el treinta por ciento de toda la atmósfera se congela cerca de los polos, formando una gigantesca masa de dióxido de carbono sólido. El mínimo de presión registrado por *Pathfinder* indica que la atmósfera pasaba entonces por su punto más tenue y que el casquete polar del sur estaba en su punto álgido.

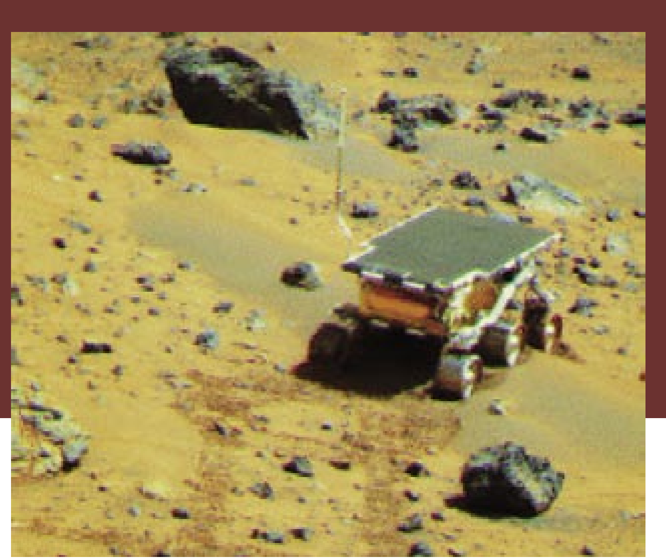
Las temperaturas matinales fluctuaban de forma abrupta con el tiempo y la altura; los sensores situados a 0,25, 0,5 y 1 metro sobre la nave tomaron registros dispares. Si estuviéramos situados en la superficie de Marte, nuestra nariz estaría a 20 grados centígrados de temperatura menos que nuestros pies. El frío aire matinal se calienta por contacto con la superficie, ascendiendo en forma de pequeños remolinos, cosa muy distinta de lo que sucede en la Tierra, donde no se registran tales disparidades de temperatura. A media tarde, después de que el aire



7. LA SECUENCIA DE ATERRIZAJE fue el mayor desafío técnico de la *Pathfinder*. Tras siete meses de viaje desde la Tierra, la sonda finalizó su etapa de crucero interplanetario treinta minutos antes de producirse su entrada en la atmósfera. Su paso por la atmósfera, que duró cinco minutos, comenzó a una altitud de 130 kilómetros y a una velocidad de 27.000 kilómetros por hora. Una sucesión de carcasas aéreas, pantallas térmicas, paracaídas, cohetes y colchones neumáticos gigantes intervinieron en el aterrizaje. A continuación desinfló los colchones, abriendo sus pétalos, y a las 16:35 hora solar local (11:34 hora del Pacífico) del 4 de julio de 1997, realizó su primera transmisión por radio.

8. LAS NUBES AZULADAS que aparecen en el cielo al amanecer, mostradas en esta imagen coloreada tomada el día sol 39 (el trigésimo noveno día marciano tras el aterrizaje), probablemente sean de agua helada. Durante la noche, el vapor de agua se congela alrededor de finas partículas de polvo, evaporándose el hielo tras la salida del sol. La cantidad total de vapor de agua que se detecta actualmente en la atmósfera marciana es baladí; de convertirse toda en precipitaciones no cubriría la superficie más que una centésima de milímetro. El aspecto de la atmósfera es, en general, parecido al observado por *Viking* hace más de veinte años.

9. LAS TIERRAS MULTICOLORES del planeta fueron removidas por el paso de las ruedas del todo terreno. Aquí el vehículo explora la "duna de la Sirena", una pila de material cubierta por gránulos oscuros. Las huellas del todo terreno también desvelaron un suelo de color granate y polvo rojizo (*parte inferior izquierda*). Se han podido deducir las propiedades de los materiales de la superficie al estudiar el efecto que tenían sobre ellos las ruedas del artefacto.



se haya calentado, las temperaturas no muestran, en cambio, estas variaciones.

Remolinos de polvo barrieron una y otra vez la zona donde estaba situada la sonda al principio de la tarde. Se manifestaron como cambios de presión rápidos y seguramente se parecían a los fenómenos detectados por los sondas orbitales *Viking*; podrían constituir un importante mecanismo para provocar la suspensión del polvo en la atmósfera marciana. El resto de los vientos predominantes fueron suaves (nunca superiores a 36 kilómetros por hora) y variables.

El *Pathfinder* midió las condiciones atmosféricas a altitudes superiores durante su descenso. La atmósfera superior (situada por encima de los 60 kilómetros) estaba más fría de lo que midió en su día el *Viking*. El dato pudiera ser consecuencia de simples variaciones estacionales y del momento concreto de la entrada del

Pruebas de un Marte más húmedo y cálido

Durante los treinta últimos años se han acumulado pruebas en favor de la hipótesis de que Marte se pareció mucho al planeta Tierra, con precipitaciones, ríos, lagos e incluso un océano. El *Pathfinder* ha añadido pruebas que refuerzan esta teoría (*rojo*).

RASGO GEOLOGICO	POSIBLE ORIGEN	IMPLICACIONES
Cadena de valles fluviales	Torrentes de agua procedentes del interior o de precipitaciones	Atmósfera más densa (que hiciese posibles las precipitaciones) o calentamiento geotérmico más intenso (causa de los flujos subterráneos)
Canal central (*thalweg*) en los valles más anchos	Flujo de agua descendente por el centro del valle	Formación de valles por torrentes de agua, no por aludes ni por fuentes
Depresiones parecidas a los lagos, con redes de drenaje; depósitos estratificados dentro de los cañones	Agua que fluye a través de los canales desembocando en los lagos	Presencia de agua en la superficie por tiempo desconocido
Posibles líneas de ribera, playas y terrazas producidas por erosión	Posible línea de costa	Posible existencia de un océano en el hemisferio norte
Cráteres sin borde y terrenos antiguos muy erosionados	Ritmos de erosión grandes	Superficie erosionada por el agua, incluso por precipitaciones
Guijarros redondeados y posibles conglomerados rocosos	Formación de rocas en torrentes de agua	Estabilidad del agua líquida; la atmósfera tenía que ser más densa y más caliente
Abundante arena	Acción del agua sobre las rocas	Abundancia de agua
Polvo muy magnético	Cemento o trazas de maghemita sobre pequeños granos de silicio (1 micra de tamaño)	Estabilidad del agua líquida; la atmósfera tenía que ser más densa y más caliente



10. LAS PIEZAS DEL *Pathfinder* aparecen como puntos brillantes en estas imágenes de gran aumento. Las pantallas térmicas se desprendieron a unos dos kilómetros al sudoeste de la sonda (*izquierda*), mientras que la coraza lo hizo como un kilómetro hacia el sudeste (*derecha*). Estas localizaciones y la de la sonda indican que soplaba un viento del sudoeste.

Pathfinder, las 3:00 hora local solar, mientras que *Viking* protagonizó su inmersión a las 16:00, cuando la atmósfera es más cálida. La temperatura mínima fue similar a la registrada por *Viking* y sus condiciones son atribuibles a la mezcla uniforme de polvo en un aire comparativamente más caliente.

Esta misión contó con la ventaja adicional de que se pudieron usar las señales de radio para medir la rotación de Marte. Un seguimiento o rastreo Doppler diario de alcance bidireccional, realizado a frecuencias inferiores durante las sesiones de comunicación, determinó a posición de la sonda con una precisión de cien metros. La última medida de posición fue realizada por *Viking* hace más de veinte años. Desde entonces se ha producido una precesión en el polo de rotación del planeta, esto es, la dirección de la inclinación de Marte ha cambiado, del mismo modo que una peonza se bambolea ligeramente. La diferencia entre las dos medidas de posición nos da la velocidad de precesión. Esta velocidad viene determinada por el momento de inercia del planeta, en función de su distribución de masa. El momento de inercia era el único parámetro de importancia de Marte que no se conocía hasta ahora.

A partir de la determinación del momento de inercia realizada por *Pathfinder*, ahora sabemos que Marte posee un núcleo central de gran contenido metálico, cuyo radio está comprendido entre los 1300 y los 2400 kilómetros. Partiendo de presunciones sobre la composición del manto, derivadas de la composición de los meteoritos y de las rocas de Marte analizadas por el vehículo móvil, pueden empezar a fijarse limites a las temperaturas internas del planeta. Antes de la misión *Pathfinder*, la composición de los meteoritos marcianos apoyaba la hipótesis de que hubiera un núcleo, pero su tamaño era completamente desconocido. La nueva información sobre el interior del planeta ayudará a los geofísicos a comprender la evolución de Marte a través del tiempo. Además de la precesión a largo plazo, *Pathfinder* detectó también una variación anual en la velocidad de rotación del planeta, justo la que cabría esperar del intercambio estacional de dióxido de carbono que se produce entre la atmósfera y los casquetes de hielo.

Si examinamos conjuntamente todos los resultados, parece razonable afirmar que Marte tuvo que ser muy parecido a la Tierra en alguna etapa de su historia, mucho más de lo que se había supuesto hasta ahora. Algunos materiales de la corteza de Marte se asemejan a la corteza continental terrestre por su contenido en silicio. Los guijarros y posibles conglomerados, así como la presencia de abundantes y diminutas partículas de arena, corroboran además la hipótesis de que el planeta dispusiese antaño de abundante agua. El ambiente primigenio sería más cálido y más húmedo, quizá parecido al de los comienzos de la Tierra. En cambio, desde que las inundaciones originaron la zona elegida para el aterrizaje —hace entre 1,8 y 3,5 mil millones de años—, Marte ha sido un planeta muy distinto al nuestro. El lugar parece haber permanecido inalterado desde que se produjeron las deposiciones, lo que indica ritmos de erosión muy bajos y carencia de agua en las épocas recientes.

Aunque no estemos seguros de que en sus orígenes Marte fuese más parecido a la Tierra, los datos recogidos por *Pathfinder* son enormemente sugerentes. La información que proporcione el *Mars Global Surveyor*, que actualmente orbita el planeta rojo, podría ayudarnos a responder a las decisivas cuestiones que siguen subsistiendo sobre este mundo tan cercano al nuestro.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

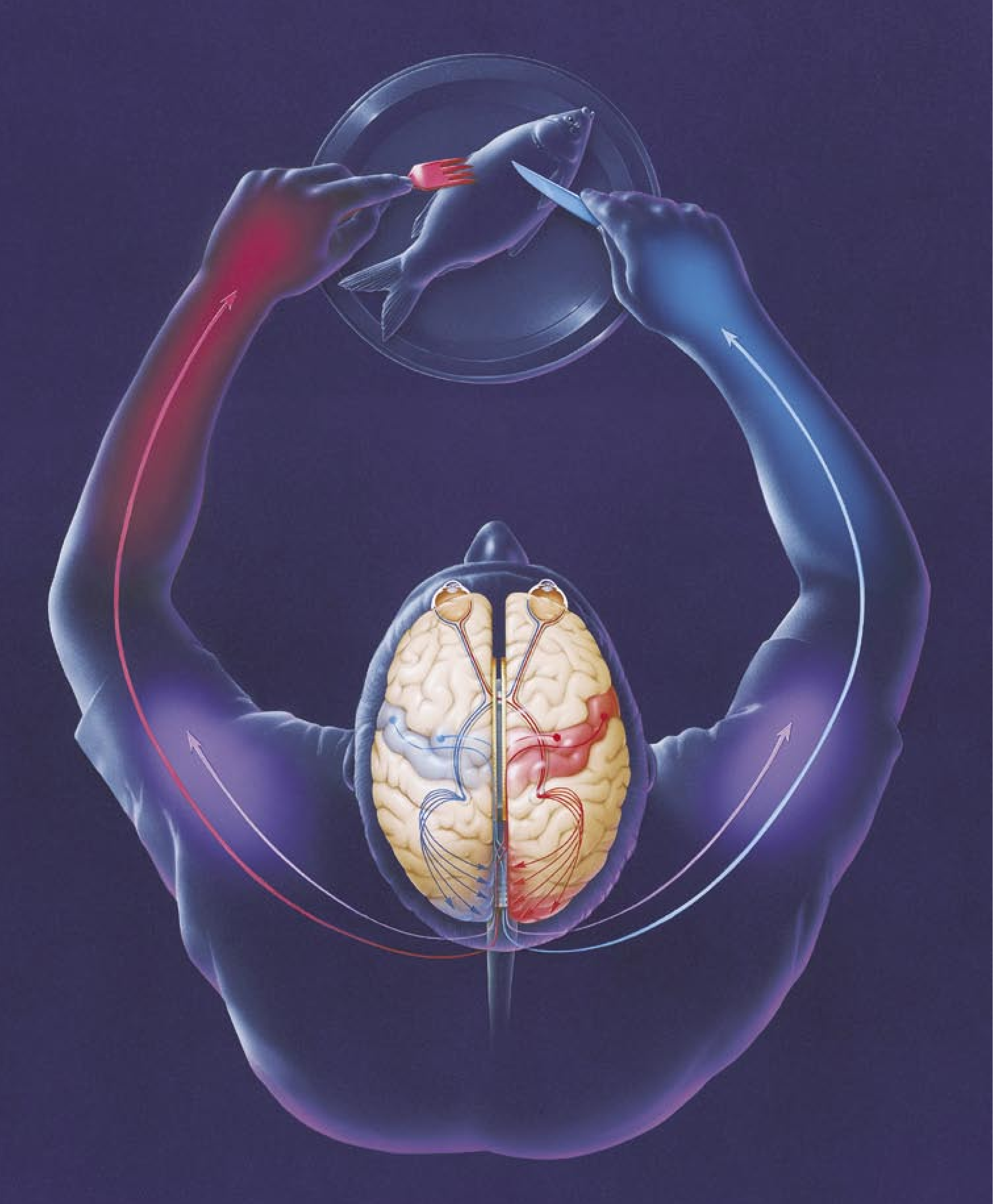
MARS. Dirigido por Hugh H. Kieffer, Bruce M. Jakosky, Conway W. Snyder y Mildred S. Matthews. Prensa de la Universidad de Arizona, 1992.

WATER ON MARS. Michael H. Carr. Prensa de la Universidad de Oxford, 1996.

MARS PATHFINDER MISSION AND ARES VALLIS LANDING SITE. Matthew P. Golombek et al., en *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, n.º E2, pág. 3951-4229; 25 febrero 1997.

MARS PATHFINDER. Matthew P. Golombek et al. En *Science*, vol. 278, pág. 1734-1774; 5 diciembre 1997.

Dos cerebros en uno



Los estudios iniciados hace más de un cuarto de siglo siguen arrojando luz sobre la organización del cerebro y de la consciencia

Michael S. Gazzaniga

Hace unos treinta años escribí en *Scientific American* sobre lo que entonces eran unos nuevos y espectaculares estudios del cerebro. Tres pacientes fueron sometidos a una intervención quirúrgica en la que se les seccionó el cuerpo calloso, la gran vía neuronal que comunica las dos mitades del cerebro, como tratamiento a la epilepsia. Roger W. Sperry, Joseph E. Bogen y yo observamos lo que les sucedía a estos pacientes cuando los hemisferios derecho e izquierdo del cerebro no podían comunicarse entre sí.

Resultó evidente que la información visual ya no pasaba de un hemisferio a otro. Si proyectábamos una imagen en el campo visual derecho, es decir, en el hemisferio izquierdo, que es donde se procesa la información del campo visual derecho, los pacientes podían describir lo que estaban viendo. Pero cuando la misma imagen se presentaba en el campo visual izquierdo, decían que no veían nada, aunque si se les pedía que señalaran un objeto semejante al proyectado, lo hacían fácilmente. El cerebro derecho había visto la imagen y podía realizar una respuesta no verbal, pero no podía decir lo que había visto.

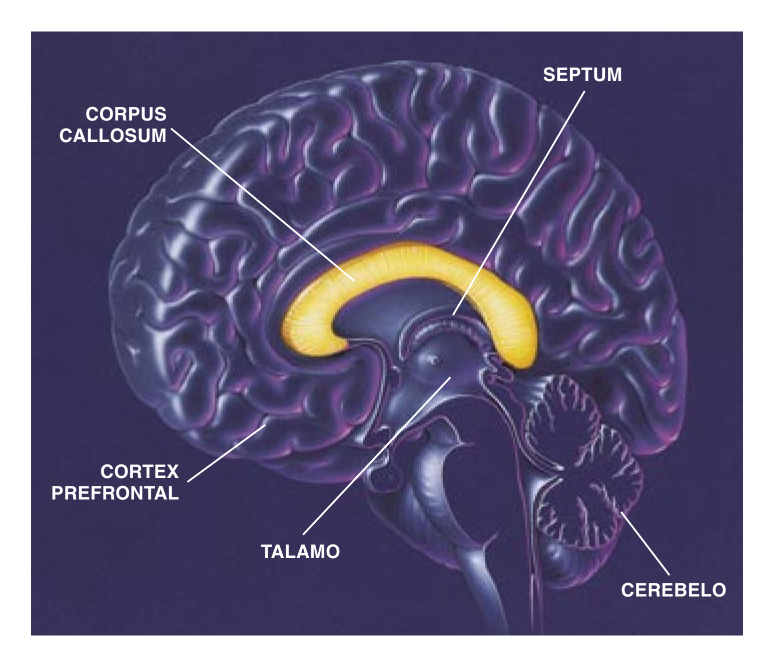
Resultados parecidos se obtuvieron en el caso del tacto, del olfato y del sonido. Cada hemisferio regulaba además los músculos superiores de los dos brazos, pero no los encargados de los movimientos de la mano y de los dedos, que no podían manejarse más que por el hemisferio contralateral. En otras palabras, el hemisferio derecho no podía gobernar más que a la mano izquierda y el hemisferio izquierdo sólo a la derecha.

Descubrimos, en fin, que los dos hemisferios regulan aspectos extraordinariamente diferentes del pensamiento y de la acción. Cada mitad tiene su propia especialización y, por tanto, sus limitaciones y ventajas. El cerebro izquierdo predomina en el caso del lenguaje y del habla, mientras que el derecho sobresale en las tareas visuales y motoras. La simbología de estos descubrimientos se ha incorporado a nuestra cultura. Los escritores hablan de su cerebro zurdo y los artistas visuales como si lo tuvieran diestro.

La investigación sobre el cerebro hendido ha seguido aclarando muchos ámbitos de las neurociencias en años posteriores. No sólo se ha aprendido más sobre las diferencias entre los dos hemisferios, sino que también se ha logrado entender cómo se comunican tras ser separados. Los estudios sobre el cerebro hendido han mejorado nuestro conocimiento de los procesos del lenguaje, de los mecanismos de la percepción y la atención, de la organización general del cerebro y de la posible sede de los falsos recuerdos. Quizá lo más fascinante haya sido su contribución a nuestra comprensión de la consciencia y de la evolución.

Los primeros estudios de cerebro hendido plantearon muchas e interesantes cuestiones, entre las que se encontraban la de si las dos mitades podían seguir "hablándose" y cuál fuese el papel que este tipo de comunicación pudiera tener en el pensamiento y en la acción. Existen diferentes puentes de neuronas, llamados comisuras, que conectan los dos hemisferios. El cuerpo calloso es la más grande y la única que suele seccionarse quirúrgicamente para tratar la epilepsia. Pero ¿qué pasa con el resto de las comisuras, las más pequeñas?

Ha podido estudiarse esta cuestión investigando el sistema de la atención. La atención no sólo pone en juego a muchas estructuras de la corteza cerebral, sino también de la subcorteza, la parte más primitiva de nuestros cerebros. Jeffrey D. Holtzman, de la Escuela de Medicina de la Universidad de Cornell, descubrió a principios de los años ochenta que cada uno de los hemisferios no sólo puede dirigir la atención espacial a su propio campo sensorial sino también a determinados puntos del campo sensorial del hemisferio opuesto desconectado. Este hecho induce a pensar que el sistema atencional sea común a los dos hemisferios, al menos en lo que se refiere a la información espacial, y que



El CABLEADO DEL CEREBRO es, en muchos casos, contralateral (*página opuesta*). El hemisferio derecho procesa la información del campo visual izquierdo, mientras que el izquierdo procesa los datos del campo visual derecho. Lo mismo sucede con el movimiento de las manos, de forma que el hemisferio derecho gobierna la mano y los dedos del brazo izquierdo, mientras que el hemisferio izquierdo controla los del derecho. Ambos hemisferios controlan, en cambio, el movimiento de la parte superior de los brazos. Los dos hemisferios están conectados por puentes neuronales, llamados comisuras. La más grande, y la que se secciona en las intervenciones de cerebro hendido, es el cuerpo calloso (*derecha*).

pueda seguir funcionando a través de algunas de las conexiones interhemisféricas residuales.

Lo verdaderamente interesante del trabajo de Holtzman fue que planteó la posibilidad de que los "recursos" de la atención fueran finitos. Su concepción consistía en que, si se trabaja en determinada tarea, se utilizan determinados recursos cerebrales; cuanto más difícil sea la tarea, más recursos se necesitan y más se ve obligada una mitad del cerebro a pedir ayuda a la subcorteza y a la otra mitad. Holtzman volvió a ser el primero en descubrir que, en efecto, cuanto más intensamente trabajaba uno de los hemisferios de un cerebro hendido, más difícil le resultaba al otro realizar tareas simultáneas.

Investigaciones recientes de Steve J. Luck, de la Universidad de Iowa, de Steven A. Hillyard y sus colegas, de la Universidad de California en San Diego, y de Ronald Mangun, de la Universidad de California en Davis, han puesto de manifiesto otro aspecto de la atención que también se conserva en el cerebro hendido. Al estudiar lo que sucedía cuando una persona buscaba una serie de rasgos o determinado objeto en un campo visual descubrieron que los pacientes con cerebro hendido realizaban mejor algunas de estas tareas de búsqueda visual que las personas normales. El cerebro intacto parece que inhibe los mecanismos naturales de búsqueda que cada hemisferio posee.

Es especialmente el hemisferio izquierdo el que puede ejercer un gran dominio sobre este tipo de actividades. Alan Kingstone, de la Universidad de Alberta, halló que el hemisferio izquierdo es "listo" en sus métodos de búsqueda, cosa que no le sucede al derecho. El hemisferio izquierdo se comporta mejor que el derecho en las pruebas consistentes en que una persona descubra un objeto discordante en un conjunto de objetos similares. Y parece que el más competente hemisferio izquierdo pudiera asumir todas las funciones de la atención.

Aunque trabajos como éstos indiquen que el cerebro hendido conserva cierta comunicación entre los dos hemisferios, se ha comprobado que algunas aparentes conexiones interhemisféricas son puramente ilusorias. Esto nos sucedió a Kingstone y a mí al realizar un experimento que casi nos hace dar un traspiés. Proyectábamos dos palabras ante la mirada de un paciente y posteriormente le pedíamos que dibujara lo que había visto. En un hemisferio se proyectó "arco" y en el otro "flecha". Nos quedamos sorprendidos al comprobar que el paciente dibujaba un arco y una flecha. Parecía como si hubiera integrado internamente toda la información en un solo hemisferio, el cual posteriormente hubiera dirigido la respuesta de dibujo.

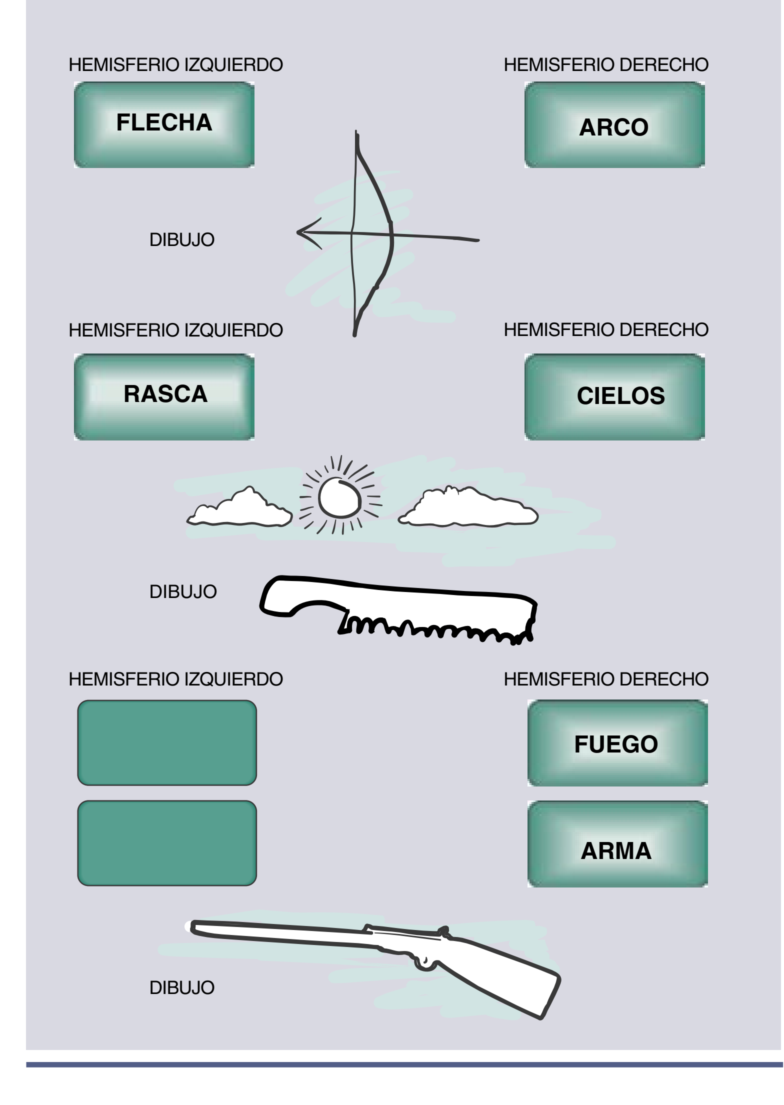
Pero estábamos equivocados y terminamos por darnos cuenta de que la integración se había producido realmente en el papel y no en el cerebro. Un hemisferio había dibujado su objeto, el arco, tras de lo cual el otro había conseguido el control de la mano para dibujar su estímulo, la flecha, encima del arco. Se trataba de una mera apariencia de coordinación, como descubrimos utilizando parejas de palabras que no encajaran tan fácilmente.

Además de ayudar a los investigadores a determinar qué sistemas siguen funcionando y cuáles se interrumpen al seccionar el cuerpo calloso, los estudios de comunicación entre hemisferios han proporcionado importantes datos sobre los límites de los estudios realizados con especies no humanas. Suelen hacerse estudios con animales para entender fenómenos humanos. Se ha estudiado durante muchos años el cerebro de los monos y de otros animales para explorar el funcionamiento del cerebro humano. En efecto, ha sido una creencia común, difundida con convicción por Charles Darwin, que la organización y las funciones del cerebro de nuestros parientes más cercanos son muy parecidas, si no idénticas, a las del nuestro.

Comprobación de la síntesis

Tal y como muestra este experimento, la capacidad de sintetizar información se pierde tras la cirugía de cerebro hendido. Un hemisferio de un paciente percibía brevemente una tarjeta con la palabra "arco"; el otro hemisferio veía "flecha". El paciente dibujó un arco y una flecha, por lo que mis colegas y yo imaginamos que ambos hemisferios seguían pudiendo comunicarse entre sí, a pesar de que el cuerpo calloso estuviese seccionado, y que habían integrado las palabras en un compuesto con significado.

Pero la siguiente prueba nos demostró que estábamos equivocados. Proyectamos "rasca" en un hemisferio y "cielos" en el otro. La imagen resultante reveló que el paciente no estaba sintetizando la información: en lugar de dibujar un edificio alto, dibujó un cielo sobre una rasqueta en forma de peine. Un hemisferio había dibujado lo que había visto y el otro había dibujado luego lo suyo. En el caso del arco y la flecha, la superposición de las dos imágenes nos engañó, porque el dibujo parecía integrado. Hicimos una última prueba para contrastar si un hemisferio podía integrar palabras por sí solo. Proyectamos primero "fuego" y luego "arma" en el hemisferio derecho. La mano izquierda dibujó un rifle, y no un arma ardiendo, dejando claro que cada hemisferio posee capacidad de síntesis.



Las investigaciones sobre el cerebro hendido han demostrado que tal suposición puede ser falsa. Aunque haya estructuras y funciones muy similares, las diferencias abundan, de lo que la comisura anterior puede proporcionarnos un claro ejemplo. Esta pequeña estructura se encuentra algo por debajo del cuerpo calloso. Los monos cuyo cerebro esté dividido pero conserven intacta esta comisura siguen pudiendo transferir información visual de un hemisferio a otro. Esto no sucede en cambio con las personas, que de ningún modo transfieren información visual. Por lo tanto, una misma estructura puede tener diferentes funciones en especies diferentes, sirviendo de ejemplo acerca de los límites de la extrapolación entre especies.

Incluso generalizar entre personas puede ser peligroso. Uno de nuestros primeros descubrimientos sorprendentes fue que el cerebro izquierdo manejaba con soltura el lenguaje y podía hablar de sus experiencias. Aunque no tan libremente, el hemisferio derecho también podía realizar algunas tareas lingüísticas, como emparejar palabras con dibujos, deletrear, rimar y clasificar objetos. Aunque nunca encontramos ninguna facultad sintáctica desarrollada en esta mitad del cerebro, pensábamos que el alcance de su conocimiento léxico era bastante impresionante.

Con los años se ha demostrado que nuestros tres primeros pacientes fueron inusuales. Contrariamente a lo que observamos inicialmente, el hemisferio derecho de la mayoría de la gente no puede manejar ni el lenguaje más rudimentario. Este hecho coincide con otros datos neurológicos, sobre todo los procedentes de pacientes apopléjicos. La lesión del hemisferio izquierdo perjudica mucho más a las funciones del lenguaje que la del derecho.

A pesar de lo cual hay mucha plasticidad y variaciones individuales. Un paciente, conocido como J. W., desarrolló la capacidad de hablar en el hemisferio derecho, cosa que hizo trece años después de la operación. J. W. puede hablar ahora de la información que se le presente a cualquiera de los dos hemisferios.

Kathleen B. Baynes, de la Universidad de California en Davis, ha estudiado otro caso único. El cerebro izquierdo de una paciente zurda podía hablar después de la operación, lo que en sí no es sorprendente, pero no podía *escribir* más que con el hemisferio derecho, que es normalmente mudo. Esta disociación confirma la idea de que la capacidad de escribir no necesita estar asociada a la capacidad de representación fonológica. Dicho de otra manera, la facultad de escribir parece constituir un sistema independiente, una invención de la especie humana. Puede darse sola y no necesita formar parte del sistema heredado que es el lenguaje hablado.

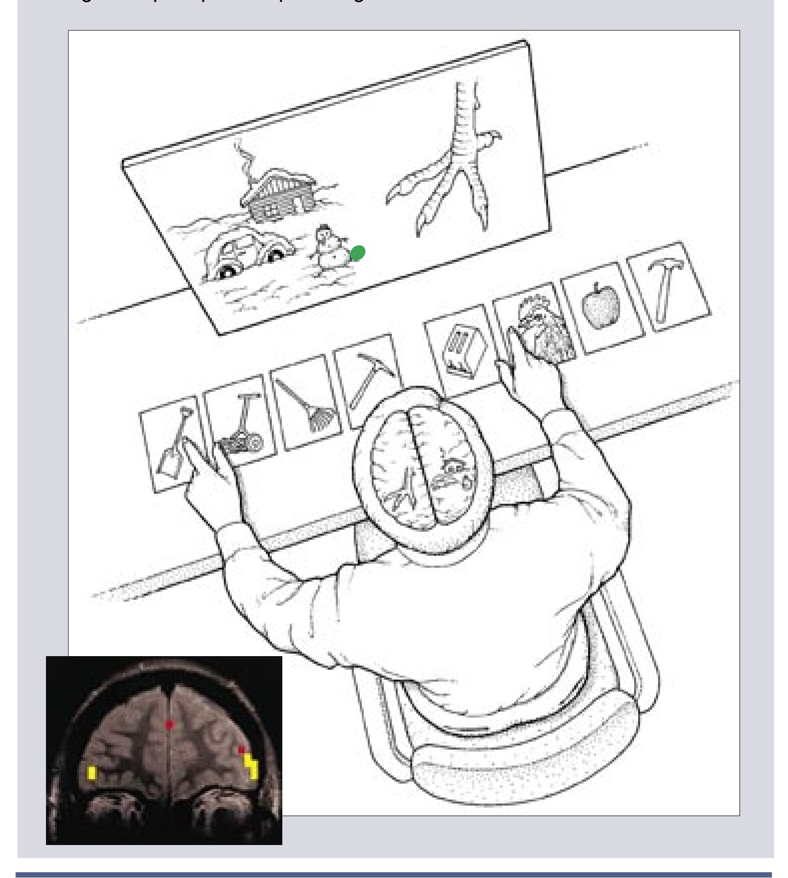
A pesar de estas y de muchas otras excepciones, la mayor parte de la investigación sobre el cerebro hendido ha revelado un enorme grado de lateralización, es decir, de especialización de cada uno de los hemisferios. El esfuerzo de los investigadores por entender cómo alcanza sus objetivos el cerebro y cómo está organizado, junto con la lateralización puesta de manifiesto por los estudios del cerebro hendido, han derivado en el llamado modelo modular. Las investigaciones de ciencia cognitiva, de inteligencia artificial, de psicología evolutiva y de neurociencia han centrado su atención en la idea de que el cerebro y la mente están construidos de unidades discretas, o módulos, que llevan a cabo funciones específicas. Según esta teoría, el cerebro no es un dispositivo general de resolución de problemas en el que cada parte sea capaz de realizar cualquier función, sino más bien un conjunto de dispositivos que atienden las demandas de procesamiento de información que la mente hace.

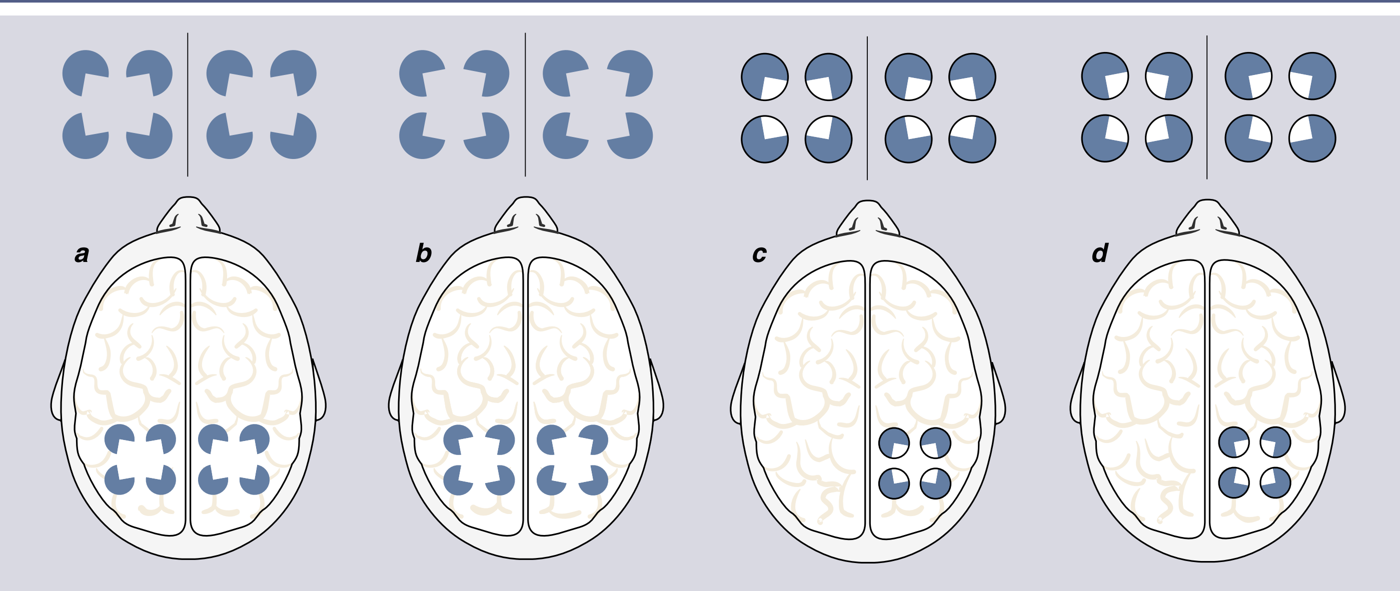
En este sistema modular se ha comprobado que el hemisferio izquierdo es completamente dominante para la mayoría de las funciones cognitivas, como la resolución de problemas. La operación de cesura del cuerpo calloso no parece afectar a estas funciones. Es como si el hemisferio izquierdo no necesitara del enorme poder computacional de la otra mitad del cerebro para realizar actividades de nivel superior, mientras que el

A la búsqueda de falsos recuerdos

Los falsos recuerdos se originan en el hemisferio izquierdo. Tal y como muestra la imagen de RMN, cuando se evoca un falso recuerdo se activan regiones de ambos hemisferios (*amarillo*), mientras que los verdaderos no requieren más actuación que la del hemisferio derecho (*rojo*). Hemos estudiado este fenómeno analizando la capacidad narrativa del hemisferio izquierdo. Para ello presentábamos a cada hemisferio cuatro pequeños dibujos, uno de los cuales estaba relacionado con otro mayor presentado también a ese hemisferio. El paciente tenía que elegir el dibujo pequeño más apropiado.

Como se ve en el dibujo, el hemisferio derecho, es decir la mano izquierda, eligió correctamente la pala para la nieve; la mano derecha, dirigida por el hemisferio izquierdo, escogió correctamente el pollo asociado con la pata de pájaro. Entonces se le preguntaba al paciente por qué la mano izquierda, o el hemisferio derecho, había señalado la pala. La contestación le corresponde al hemisferio izquierdo, que es el único con capacidad de hablar. Pero como no tenía forma de saber por qué causa el hemisferio derecho había realizado su elección, inventó una historia sobre lo que podía ver, es decir, sobre el pollo, diciendo que el hemisferio derecho había escogido la pala para limpiar un gallinero.





En busca de ilusiones

Los contornos ilusorios revelan que el cerebro derecho humano puede procesar determinadas cosas que el izquierdo no puede. Ambos hemisferios pueden "ver" si los rectángulos ilusorios de este experimento son apaisados (*a*) o verticales (*b*). Pero sólo el hemisferio derecho puede seguir reconociendo las diferencias cuando se añaden los contornos (*c* y *d*). Cualquiera de los dos hemisferios de un ratón percibe sin problema las diferencias. El hecho de que los roedores realicen esta prueba mejor que nosotros lleva a pensar que, al evolucionar, el cerebro humano haya perdido algunas facultades de uno u otro hemisferio. Las nuevas habilidades puede que hayan tenido que desalojar a las viejas para poder acomodarse.

hemisferio derecho es muy deficiente resolviendo problemas difíciles.

Es ésta una característica del cerebro izquierdo que Joseph E. Ledoux y yo descubrimos hace casi veinte años. Nos habíamos planteado una cuestión simple: ¿cómo responde el hemisferio izquierdo a conductas realizadas por el cerebro derecho mudo? A cada hemisferio se le presentaba un dibujo que estaba relacionado con alguno de otros cuatro dibujos situados frente al sujeto con cerebro hendido. Los hemisferios derecho e izquierdo no tenían dificultad para escoger la tarjeta correcta. La mano izquierda señalaba la elección del hemisferio derecho y la mano derecha la del hemisferio izquierdo (*véase el recuadro*).

Posteriormente preguntábamos al hemisferio izquierdo, el único capaz de hablar, por qué la mano izquierda había escogido el objeto. Realmente no lo sabía, porque la decisión de señalar la tarjeta la había realizado el hemisferio derecho. A pesar de todo, con la velocidad del rayo, inventaba una explicación. A este talento narrativo y creativo le dimos el nombre de mecanismo de interpretación.

Se han hecho estudios recientes de esta fascinante facultad para determinar la forma en que el mecanismo interpretativo del hemisferio izquierdo afecte a la memoria. Elizabeth A. Phelps, de la Universidad de Yale, Janet Metcalfe, de la Universidad de Columbia, y Margaret Funnell, una becaria posdoctoral de la Escuela de Dartmouth, han descubierto que las capacidades de los dos hemisferios para procesar nueva información son diferentes. Las personas solemos recordar la mayoría de la información que nos llega. Cuando se nos hacen preguntas, también solemos decir que recordamos cosas que verdaderamente no formaron parte de la experiencia. Si se somete a este tipo de pruebas a pacientes con cerebro hendido, el hemisferio izquierdo genera muchos informes falsos, mientras que el derecho no lo hace, proporcionando relatos mucho más verídicos.

Este dato puede contribuir al esclarecimientos de cuándo y cómo se desarrollan los falsos recuerdos. Existen diferentes opiniones sobre el momento en que se establecen estos recuerdos en el ciclo de procesamiento de la información. Hay investigadores que piensan que se desarrollan al principio del ciclo, que los relatos erróneos se registran realmente cuando se produce la experiencia. En opinión de otros, los recuerdos falsos reflejan errores en la reconstrucción de las experiencias pasadas. Dicho de otro modo, que todos encajamos los hechos en esquemas y que luego, al recordar la experiencia original, añadimos los hechos falsos que la consistencia del esquema requiere.

El hemisferio izquierdo presenta ciertas características que apoyan esta última idea. En primer lugar, es precisamente en el desarrollo de este tipo de esquemas en lo que destaca el mecanismo interpretativo del hemisferio izquierdo. En segundo lugar, Furnell ha descubierto que el hemisferio izquierdo es capaz de determinar el origen de un recuerdo basándose en el contexto o en hechos circundantes. Sus trabajos indican que el hemisferio izquierdo se esfuerza por situar las experiencias que le llegan en un contexto amplio, mientras que el derecho se ocupa simplemente de los aspectos perceptivos del estímulo. Finalmente, Michael B. Miller, un estudiante graduado en Darmouth, ha demostrado que las regiones prefrontales del hemisferio izquierdo de los sujetos normales están activadas cuando se evocan recuerdos falsos.

Todos estos datos hacen pensar que el mecanismo interpretativo del hemisferio izquierdo está siempre

trabajando intensamente, buscando el significado de los hechos. Se ocupa constantemente de buscar orden y razón, aun cuando no los haya, lo que le obliga a cometer continuos errores. Tiende a generalizar en exceso, construyendo bastantes veces un pasado posible que es distinto del pasado real.

George L. Wolford, de Dartmouth, ha reforzado esta concepción del hemisferio izquierdo. Los seres humanos se comportan creativamente en una sencilla prueba, consistente en adivinar si se va a iluminar la parte superior o la inferior de una pantalla de ordenador. El experimentador manipula el estímulo para que la luz aparezca arriba el 80 % de las veces, aunque de forma aleatoria. Enseguida se da uno cuenta de que la parte superior de la pantalla se ilumina más a menudo, pero los sujetos siempre tratan de descubrir la pauta completa, muy convencidos de que pueden hacerlo. La adopción de este enfoque hace que no acierten más que el 68 % de las veces, mientras que si presionaran siempre el botón superior, su nivel de acierto sería del 80 %.

Las ratas y los demás animales se inclinan a "sacar todo lo que se pueda" y no aprietan más que el botón de arriba. Resulta que ésta es también la manera en que se comporta el hemisferio derecho: no trata de interpretar lo que sucede ni de encontrarle significados más profundos. Se limita a vivir la fugacidad del presente y a acertar el 80 % de las veces. Cuando, por el contrario, se le pide al izquierdo que explique por qué intenta imaginar la secuencia completa, siempre encuentra una teoría, por descabellada que sea.

Este fenómeno narrativo se explica mejor por la teoría evolutiva. El cerebro humano, como cualquier otro, es un conjunto de adaptaciones neurológicas establecidas por selección natural. Cada una de estas adaptaciones tiene su propia representación, es decir, su forma de concretarse en regiones o redes neuronales específicas. Lo normal en el reino animal es que las facultades no estén lateralizadas, tendiendo a encontrarse equitativamente repartidas por ambos hemisferios. Los monos muestran algunos signos de especialización lateral, pero son raros y excepcionales.

Esta es la razón de que siempre se haya pensado que la lateralización del cerebro humano es un añadido evolutivo, el de los mecanismos o facultades asentados en un único hemisferio. Pero esta opinión se ha visto cuestionada hace poco por una asombrosa disociación hemisférica que descubrimos, que nos ha obligado a especular si no será más bien que ciertos fenómenos de lateralización se produzcan porque alguno de los hemisferios pierda facultades y no porque las adquiera.

En lo que tuvo que ser una dura competencia por el espacio cortical, el cerebro en evolución de los primates debió de tener dificultades para adquirir nuevas facultades sin perder las antiguas. La lateralización pudo ser su salvación. Al estar los dos hemisferios conectados, las mutaciones podrían hacer que una región cortical homóloga asumiera una nueva función, incluso sin coste alguno para el animal, ya que el otro lado permanecería intacto.

Paul M. Corballis, un becario posdoctoral en Darmouth, Robert Fendrich, de Darmouth, Robert M. Shapley, de la Universidad de Nueva York, y yo hemos estudiado en muchos pacientes con cerebro hendido la percepción de los llamados contornos ilusorios. Los trabajos previos indicaban que la visión de los conocidos contornos ilusorios de Gaetano Kaniza, de la Universidad de Trieste, era una especialidad del hemisferio derecho. Nuestros experimentos muestran una situación diferente.

Hemos comprobado que los dos hemisferios pueden percibir contornos ilusorios, pero que el derecho es capaz de comprender ciertas agrupaciones perceptuales que el izquierdo no puede. Ambos hemisferios de una persona que tenga el cerebro hendido pueden determinar si los rectángulos ilusorios son apaisados o esbeltos cuando no hay trazadas líneas alrededor de las figuras de "Pacman", pero sólo el hemisferio derecho sigue viendo estas diferencias cuando se dibujan los perímetros (*véase el recuadro*). Esta última forma se denomina la versión amodal de la prueba.

Lo que resulta interesante es que el propio Kaniza haya demostrado que los ratones pueden realizar la versión amodal de la prueba. El hecho de que un humilde ratón pueda percibir agrupamientos que escapan al hemisferio izquierdo humano parece indicar que se han perdido facultades. ¿Pudiera ser que la aparición de una nueva facultad humana, como sería el lenguaje o un mecanismo interpretativo, expulsara esta posibilidad perceptiva del hemisferio izquierdo? Nuestra respuesta es afirmativa, opinión que proporciona nuevas perspectivas sobre los orígenes de la especialización lateral.

Las facultades humanas parecen radicar en redes neuronales diminutas y restringidas. Pero, a pesar de su gran nivel de modularización, nuestro cerebro genera la sensación de que somos íntegros y únicos. ¿Cómo es posible que tengamos tal sensación si somos una colección de módulos especializados?

La respuesta pudiera consistir en que el hemisferio izquierdo busca explicaciones de por qué suceden las cosas. La ventaja de un sistema de este tipo es obvia. Un cerebro que vaya más allá de la simple observación de los hechos, preguntándose por qué ocurren, podrá enfrentarse a ellos en mejores condiciones si volviesen a pasar.

El conocimiento de las excelencias y las debilidades de cada hemisferio nos ha hecho pensar en las bases de la mente y en su astuta organización. El resultado de muchos años de fascinante investigación sobre el cerebro hendido parece ser que el ingenioso e interpretativo hemisferio izquierdo tiene una experiencia consciente muy diferente de la exacta y literal del hemisferio derecho. Aunque ambos puedan considerarse conscientes, la consciencia del cerebro izquierdo supera con mucho a la del derecho. Esto plantea nuevas cuestiones que nos mantendrán ocupados durante los próximos treinta años y puede que más.

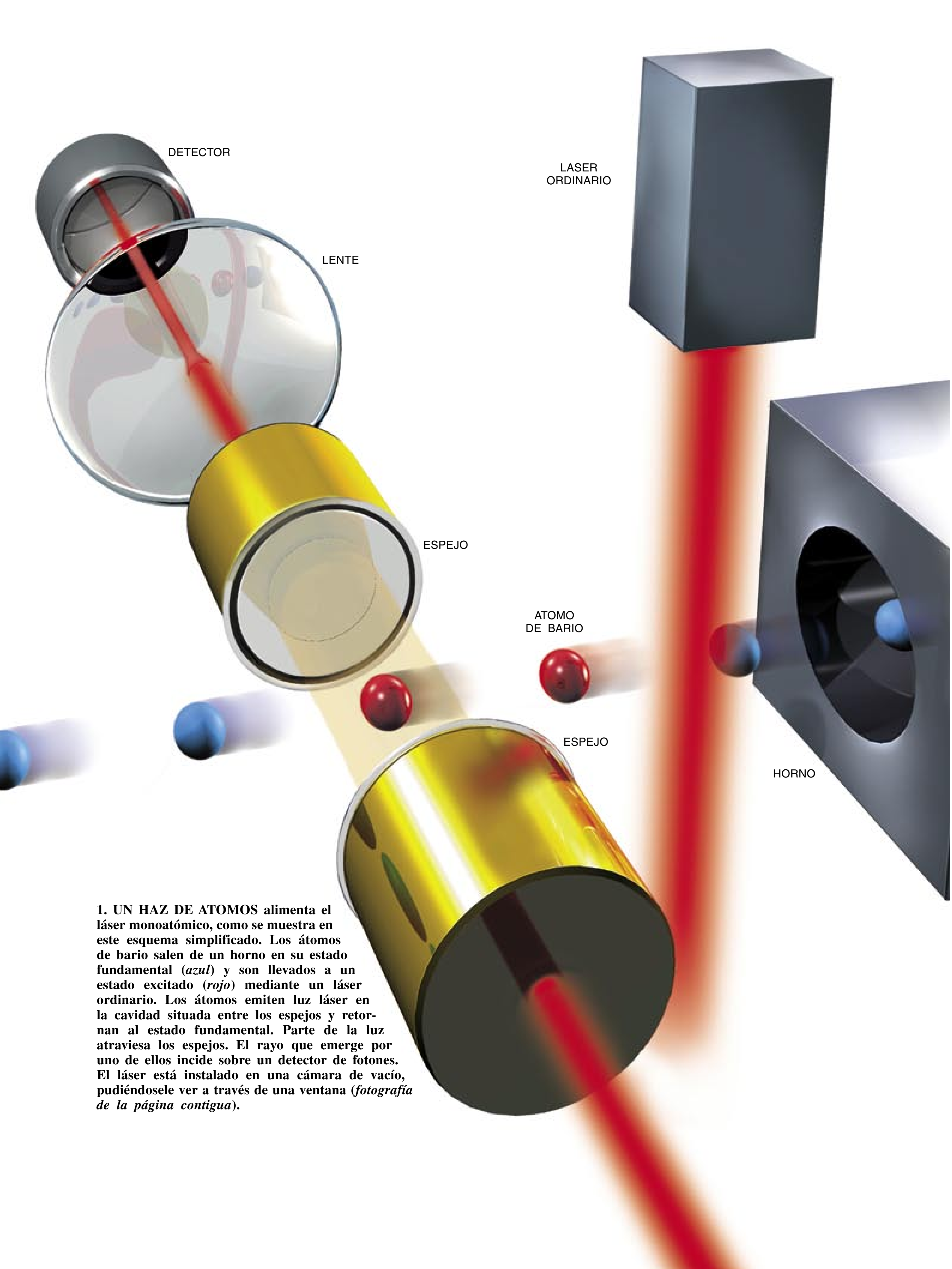
MICHAEL S. GAZZANIGA es profesor de neurociencia cognitiva y director del Centro de Neurociencia Cognitiva en la Escuela de Darmouth. Obtuvo su doctorado en el Instituto de Tecnología de California, donde junto con Roger W. Sperry y Joseph E. Bogen inició los estudios sobre el cerebro hendido.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HOW THE MIND WORKS. Steven Pinker. W. W. Norton, 1997.

THE MIND'S PAST. Michael S. Gazzaniga. University of California Press, 1998.

THE TWO SIDES OF PERCEPTION. Richard B. Ivry y Lynn C. Robertson. MIT Press, 1998.



1. UN HAZ DE ATOMOS alimenta el láser monoatómico, como se muestra en este esquema simplificado. Los átomos de bario salen de un horno en su estado fundamental (*azul*) y son llevados a un estado excitado (*rojo*) mediante un láser ordinario. Los átomos emiten luz láser en la cavidad situada entre los espejos y retornan al estado fundamental. Parte de la luz atraviesa los espejos. El rayo que emerge por uno de ellos incide sobre un detector de fotones. El láser está instalado en una cámara de vacío, pudiéndosele ver a través de una ventana (*fotografía de la página contigua*).

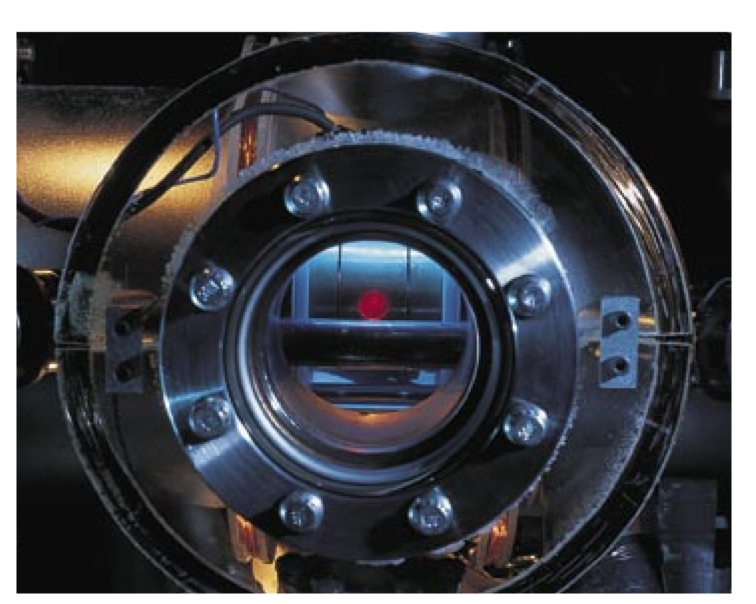
El láser monoatómico

Se trata de un nuevo tipo de láser que canaliza la energía de los átomos individuales y revela la forma en que la luz y la materia se relacionan

Michael S. Feld y Kyungwon An

El láser se inventó hace casi medio siglo y desde entonces ha ido encontrando usos cada vez más variados. Los profesores y los guías turísticos usan sus finos rayos como punteros, las cajeras de los supermercados lo hacen para leer los códigos de barras de los productos alimenticios y los aficionados a la música disfrutan de la gran calidad de las grabaciones que les ofrecen los diminutos láseres contenidos en sus aparatos reproductores de discos compactos. Todos ellos se basan en un principio común: un número enorme de átomos o de moléculas, comprendido entre millones y billones, trabaja al unísono para producir un intenso rayo de luz monocromática. Recientemente se ha desarrollado un láser distinto, que trabaja con el menor número de átomos posible, que es uno.

El láser monoatómico no puede leer códigos de barras ni tocar música; su potencia de salida es alrededor de la billonésima parte de un watio (los láseres que tienen los reproductores de discos compactos son muchos millones de veces más potentes). Pero el dispositivo ya ha demostrado su importancia como medio de experimentación. La luz generada por el láser monoatómico presenta propiedades que sólo pueden explicarse apelando a la mecánica cuántica, la teoría que gobierna las interacciones producidas en las escalas atómica y subatómica. Si se analiza la operación del láser en diversas condiciones, pueden someterse a prueba las predicciones de la teoría cuántica y atisbar nuevas ideas sobre la naturaleza de la luz.



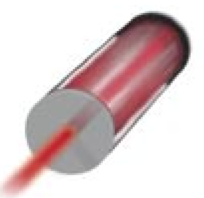
El láser corriente

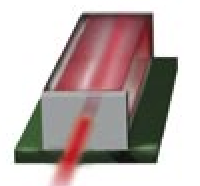
Para que pueda comprenderse el funcionamiento del láser monoatómico es necesario que se entienda primero la forma de operar de los corrientes. Todo láser tiene dos componentes fundamentales: un resonador óptico, que suele estar formado por dos espejos paralelos entre los que se refleja la luz repetidamente, y una sustancia que ocupa el espacio situado entre los espejos y que es la que genera y amplifica la luz láser. El láser de helio-neón, por ejemplo, utiliza una mezcla de estos gases como tal medio, mientras que en el de YAG-neodimio son los iones neodimio embebidos en un cristal granate de itrio y de aluminio los que constituyen el medio. Los átomos o las moléculas del medio no son homogéneos, sino que están distribuidos entre muchos estados cuánticos distintos, llamados niveles de energía. Sólo uno de los elementos o sustancias del medio participa en el proceso láser y sólo una diminuta fracción de sus átomos emite de hecho este tipo de luz. A éstos se les denomina átomos activos, mientras que al resto se les califica como átomos de fondo. Los átomos activos alternan entre dos estados de energía. La amplificación de luz no puede ocurrir más que cuando el número de átomos activos que se encuentren en el nivel de energía superior, o nivel excitado, exceda al número de los situados en el estado de energía menor. Esta condición se conoce como inversión de la población.

El láser utiliza una fuente de energía externa, como pudiera ser una descarga eléctrica, para impulsar a los átomos activos del estado de baja energía al excitado. Pero los átomos excitados no permanecen en esta condición indefinidamente, pues su tendencia natural es a recaer en el estado de baja energía. Cuando lo hacen, emiten luz en direcciones aleatorias, proceso conocido como emisión espontánea. Una pequeña fracción de esa luz, que no suele pasar de algunas millonésimas, se dirige hacia uno de los espejos y resulta reflejada hacia el medio láser, lo que induce a los átomos excitados a emitir fotones adicionales con las mismas longitud de onda, dirección y fase. Esta producción de luz con las mismas características que la luz original, llamada emisión estimulada, es la responsable de muchas de las extraordinarias propiedades de la radiación láser. A medida que la luz rebota una y otra vez entre los espejos, el medio láser la va amplificando de manera continuada. Una pequeña porción de ella atraviesa uno de los espejos, que es algo menos reflectante que el otro, lo que hace que emerja el conocido rayo láser.

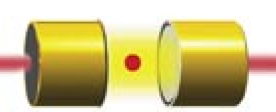
Si ha de producirse la oscilación láser, es necesario que la ganancia láser, es decir, el aumento de intensidad

TIPOS DE LASER









	HELIO-NEON	YAG-NEODIMIO	SEMICONDUCTOR DE MICROGRAVEDAD	DE UN SOLO ATOMO
DISTANCIA ENTRE ESPEJOS	20 A 100 CENTIMETROS	5 A 15 CENTIMETROS	2 A 5 MICRAS	1 MILIMETRO
NUMERO DE ATOMOS	10^{16} ATOMOS DE NEON	10^{19} IONES NEODIMIO	10^{6} PARES ELECTRON HUECO	1 ATOMO DE BARIO
POTENCIA (WATT)	0,001	1,0	0,0001	0,000000000001

2. CUATRO LASERES de características muy diferentes, aunque todos produzcan haces de luz monocromáticos. El láser de helio-neón se usa en todos los supermercados que disponen de lectores de código de barras, mientras que el más potente láser YAG-neodimio se usa en cirugía. El láser semiconductor de microcavidad pudiera usarse algún día en computadoras ópticas. El láser monoatómico es un instrumento experimental, pero no es imposible que encontrase aplicaciones en el procesamiento de la información con poco ruido y en espectroscopía de precisión.

experimentado por la luz al atravesar el medio, sea mayor que la pérdida de intensidad del rayo originada por diversos factores, entre los que se cuentan las imperfecciones de los espejos. Este requisito se conoce como condición umbral láser. Los láseres corrientes necesitan que el medio contenga un número elevadísimo de átomos o de moléculas para que la ganancia exceda a las pérdidas. Por ejemplo, un láser de helio-neón que emita un miliwatio de potencia contendrá varios miles de billones de átomos de neón y unas diez veces más átomos de helio. La amplificación de luz alcanza el equilibrio cuando rebotan entre los espejos del resonador alrededor de mil millones de fotones. En otras palabras, se necesitan varios millones de átomos de neón y varias decenas de millones de átomos de helio para mantener a cada fotón del resonador.

Hay varias maneras de reducir este número. Si se mejora la reflectividad de los espejos, disminuirán las pérdidas de intensidad del haz, de manera que los fotones permanecerán más tiempo en el resonador y se acumularán con mayor facilidad. En algunos casos puede aumentarse la ganancia láser reduciendo el número de átomos del fondo, que interfieren con la amplificación de la luz cuando chocan con los átomos activos. Pero en la práctica incluso los láseres corrientes más eficaces necesitan al menos 100.000 átomos por cada fotón almacenado en el resonador. Es evidente que un láser normal no puede generar un rayo con un único átomo.

Atomos en cavidades

Nuestro láser monoatómico utiliza un método diferente para amplificar la luz, basado en un proceso conocido como oscilación cuantizada de Rabi, fenómeno estudiado por quienes se ocupan de la electrodinámica cuántica en cavidades, que gobierna el comportamiento de los átomos en resonadores diminutos (*véase* "Electrodinámica cuántica en cavidades", por Serge Haroche y Jean-Michel Raimond; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio 1993). Quizá se trate de la forma más elemental de interacción entre la luz y la materia.

La oscilación de Rabi es el intercambio periódico de energía entre los átomos y un campo electromagnético. El físico I. I. Rabi fue el primero que estudió este proceso hacia 1930. Sometió una muestra de átomos a la acción de ondas de radio especialmente sintonizadas y descubrió que los átomos saltaban de su estado fundamental al excitado a medida que absorbían energía del campo. Esta absorción ocurría porque la energía de los fotones de radiofrecuencia se ajustaba a la diferencia de energía existente entre los estados fundamental y excitado. Cuando todos los átomos habían alcanzado el estado excitado, no podían seguir absorbiendo energía de las ondas y el proceso se invertía. Cuando se les sometía a irradiación continuada, los átomos empezaban a reemitir la energía al campo aplicado y retornaban al estado fundamental, momento en el que volvían a absorber energía del campo, repitiéndose el ciclo.

Los experimentos de Rabi no permitían observar el comportamiento de átomos y de fotones individuales. Como los fotones de la zona de las radiofrecuencias tienen muy poca energía, incluso una onda de poca potencia contiene un número enorme de ellos. Se dan tantos intercambios de energía entre los átomos y los fotones que sus efectos se promedian, no dejando oportunidad de estudiar la naturaleza mecanocuántica del intercambio. Pero Edwin T. Jaynes y Frederick W. Cummings desarrollaron a comienzos de los años sesenta una teoría que explicaba cómo interactuaría un único átomo que tuviese dos niveles de energía con una onda luminosa formada por un pequeño número de fotones. Cuando no hay más que un átomo, las frecuencias de oscilación de Rabi no pueden ser arbitrarias sino que tienen que adoptar valores específicos, como les sucede a los niveles de energía de los átomos. En otras palabras, un átomo con dos niveles emitirá y absorberá fotones en distintas proporciones, determinadas por la magnitud del campo eléctrico que lo rodee.

Una notable consecuencia de esta teoría es que se puede inducir la emisión de un fotón por un átomo excitado sin más que situarlo en una cavidad muy pequeña. Si la cavidad es resonante, esto es, si las paredes son reflectantes y sus dimensiones se ajustan de tal modo que los fotones que el átomo emite se vayan acumulando dentro, se da un acople mecanocuántico que hace que

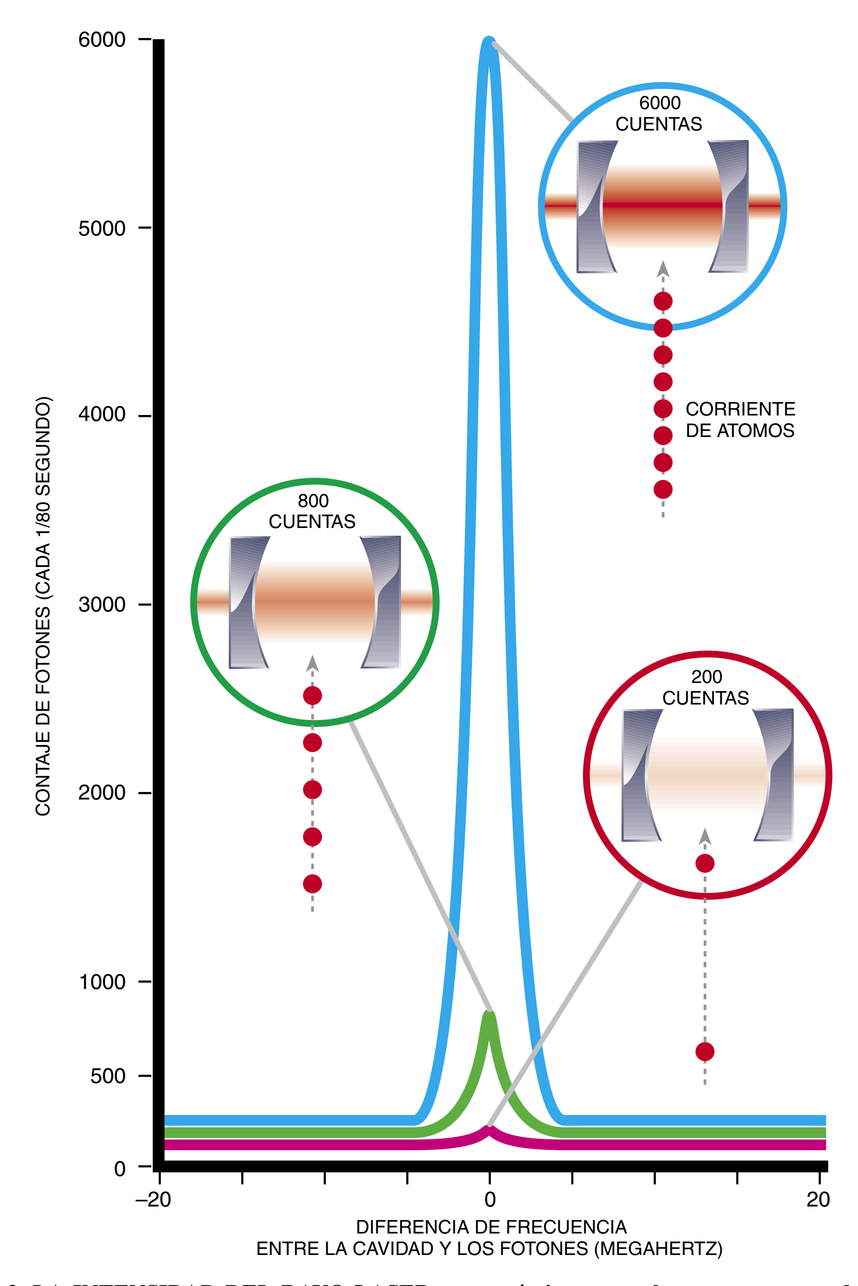
el átomo emita fotones mucho más rápidamente que si estuviese suelto en el espacio. Si permanece en la cavidad, reabsorberá el fotón emitido y se repetirá el ciclo. Este proceso se conoce como oscilación de Rabi en el vacío, ya que la cavidad carece de campo electromagnético inicial. Si ya hubiese en ella uno o más fotones antes de la introducción del átomo excitado, éste experimentará oscilaciones cuantificadas de Rabi y emitirá y absorberá fotones con celeridad creciente.

La comprobación de este fenómeno en el laboratorio se produjo en 1984, cuando Herbert Walther puso a punto el micromáser, un dispositivo de microondas basado en la teoría cuántica. Su experimento consistió en hacer pasar a cada uno de los átomos de Rydberg de un haz (átomos cuyos electrones más externos están excitados de forma que describan amplias órbitas circulares) por una pequeña cavidad metálica de paredes muy reflectantes. La cavidad era análoga al resonador de un láser y sus dimensiones se adecuaban a la longitud de onda de los fotones emitidos por los átomos Rydberg cuando regresan a un estado de menor energía, lo que los sitúa en el rango de las microondas. Cuando los átomos pasaban por la cavidad, emitían fotones a ritmo creciente, como habían predicho Jaynes y Cummings. Los fotones pudieron acumularse en el resonador debido a que las paredes eran superconductoras y pudieron enfriarse hasta casi el cero absoluto para optimizar su reflectividad.

El láser monoatómico es una versión óptica del micromáser, obtenida haciendo pasar de uno en uno por un resonador diminuto átomos de dos niveles de excitación, que emiten fotones infrarrojos situados justo a continuación del rango visible. El primer fotón se emite dentro de la cavidad vacía por el efecto de la oscilación de Rabi en el vacío y la amplificación posterior de la luz ocurre mediante el proceso de la oscilación cuantizada de Rabi. A medida que aumenta el número de fotones contenidos en la cavidad, aumenta la probabilidad de que un átomo que pase por el resonador emita otro fotón. Este reforzamiento constituye el proceso fundamental de la emisión estimulada de un láser normal.

La construcción de un láser monoatómico operativo depende de que se pueda construir un resonador óptico capaz de almacenar un fotón durante un tiempo relativamente largo antes de que sea absorbido por uno de los espejos o transmitido hacia fuera. Nosotros hemos empleado un nuevo tipo de resonador, conocido como supercavidad, que consiste en dos espejos en extremo reflectantes, alineados con gran precisión. Los ingenieros de la NASA descubrieron en los años sesenta, cuando intentaban desarrollar un sistema de propulsión mediante iones de gran velocidad, que los haces iónicos recubrían las paredes de una cámara de vacío con una película muy reflectante. Haces de iones se usaron posteriormente para recubrir los espejos de los giroscopios láser. Aunque este método proporcionaba una reflectancia inmejorable, las mínimas imperfecciones de la forma del espejo limitaban su operatividad como resonador.

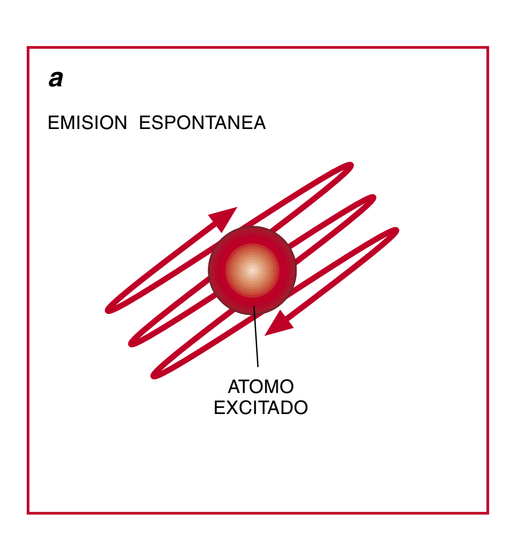
Una forma de resolver este problema es no utilizar más que una reducida zona del espejo, como de un milímetro de diámetro, orillando las imperfecciones en la hechura del espejo. Los espejos trabajan bien en un resonador en estas condiciones, consiguiéndose reflectividades de hasta el 99,9999 por ciento. (Los



3. LA INTENSIDAD DEL RAYO LASER monoatómico crece abruptamente cuando entra en el resonador un flujo denso de átomos de bario. Si el haz es tenue, el rendimiento del láser es mucho menor. Nótese que el contaje de fotones desciende a un nivel de fondo cuando la frecuencia resonante de la cavidad no se ajusta a la frecuencia de los fotones emitidos.



4. LAS OSCILACIONES DE RABI, estudiadas originalmente por I. I. Rabi (*a la izquierda*), causan la emisión de fotones en el láser monoatómico. Un átomo excitado que se encuentre en el espacio libre emitirá espontáneamente un fotón en una dirección aleatoria (*a*). Pero si se encontrase en una cavidad resonante, el átomo emitirá más rápidamente un fotón hacia los espejos, cuya separación se ha fijado con gran precisión (*b*). Este proceso se conoce como oscilación de Rabi en el vacío. Si otro átomo excitado entrase entonces en la cavidad, la presencia del fotón le induciría a llevar a cabo oscilaciones de Rabi cuantizadas y sería mayor su tasa de emisión de otro fotón en la misma dirección.



espejos de los láser corrientes suelen tener reflectividades del 99 por ciento, mientras que los de pared típicos no llegan más que al 90 por ciento.) Tales resonadores pueden almacenar fotones 10.000 veces mejor que los de un láser normal. Los espejos de nuestro láser monoatómico tenían una reflectividad del 99,9997 por ciento y estaban separados por una distancia de un milímetro. Los fotones se reflejaban un cuarto de millón de veces en ellos antes de que fuesen absorbidos o transmitidos.

Desgraciadamente es difícil mantener la supercavidad "sintonizada" a la frecuencia de los fotones emitidos cuando los átomos caen a un estado de energía menor. Si los espejos se mueven aunque sea muy ligeramente y el acople resonante se pierde, no podrán darse las oscilaciones de Rabi y los átomos que estén en la cavidad no emitirán fotones. Nosotros utilizamos un transductor piezoeléctrico para asegurar la resonancia, el cual ajustaba la separación de los espejos.

MICHAEL S. FELD y KYUNGWON AN son los coinventores del láser monoatómico. Feld es profesor de física en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y director del Laboratorio George R. Harrison de Espectroscopía. An recibió su doctorado en física en el MIT en 1994; su trabajo de tesis fue precisamente el láser monoatómico. Ahora es profesor asistente del Instituto Coreano Avanzado de Ciencia y Tecnología en Taejon, Corea del Sur.

Como es sabido, el efecto piezoeléctrico convierte un voltaje que se aplique a determinados cristales en desplazamiento mecánico. Un servocircuito comprobaba la separación y corregía cualquier desviación de la distancia correcta entre los espejos, aunque no fuese más que de una diezmilésima de nanómetro.

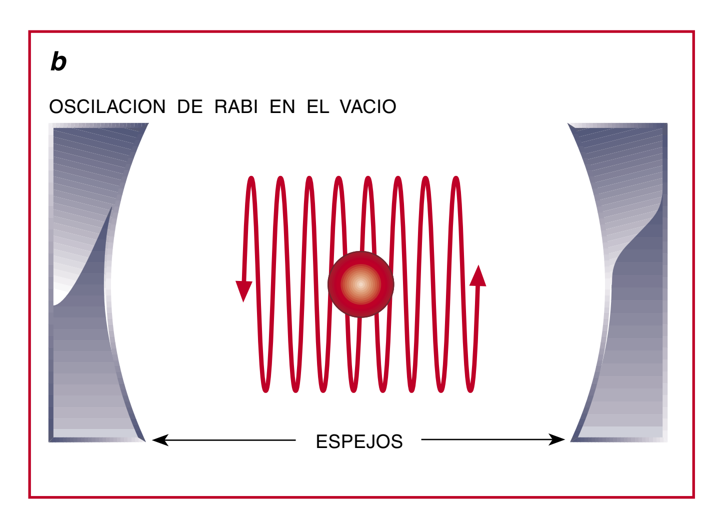
Otro aspecto decisivo fue la selección del tipo de átomo que habría de ponerse dentro del resonador. Tenía que ofrecer un par de niveles de energía adecuado y una tasa de emisión espontánea baja, ya que de lo contrario se perturbarían las relaciones entre el átomo y la cavidad. Nos decidimos por los átomos de bario, que emiten fotones con una longitud de onda de 791 nanómetros cuando decaen del estado excitado al fundamental. Para prepararlos sometimos a evaporación bario metálico en un horno, dirigiendo luego el vapor hacia el hueco entre los espejos. El horno producía un estrecho haz que avanzaba a una velocidad promedia de 360 metros por segundo. Como el resonador era pequeño y la densidad de la corriente de átomos reducida, no había más que un átomo de bario dentro del resonador en un instante dado.

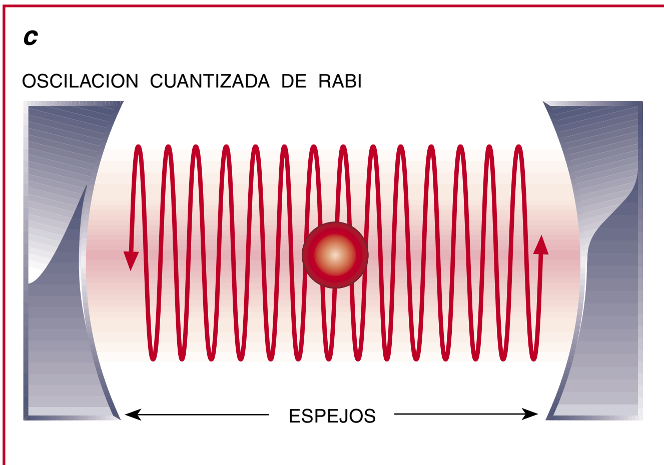
Justo antes de que los átomos entrasen en la cavidad, pasaban a través del haz de luz generado por un láser normal de zafiro-titanio, que estaba ajustado con precisión para excitarlos al estado de mayor energía. Si se les hubiera permitido, volverían espontáneamente al estado fundamental en un tiempo promedio de tres millonésimas de segundo, emitiendo fotones con una longitud de onda de 791 nanómetros. Pero como la longitud de onda resonante de la cavidad era la misma, algunos de ellos emitían sus fotones durante los 200 nanosegundos que duraba su tránsito entre los espejos.

Cuando el primer átomo entra en el resonador vacío hay una probabilidad del 23 por ciento de que experimente la oscilación de Rabi en el vacío y emita un fotón. Pero una vez emitido el primer fotón, el campo electromagnético creado dentro del resonador ejerce una gran influencia sobre el siguiente átomo de bario que entre en la cavidad, cuya probabilidad de emitir un fotón aumenta al 42 por ciento. A medida que crece el número de fotones que se encuentran en el resonador, la probabilidad de emisión fotónica sigue aumentando. Todos los fotones emitidos comparten además las mismas dirección y fase, que vienen definidas por la geometría del resonador. El resultado es un tenue rayo de fotones láser que salen de la cavidad en una dirección perpendicular al haz de átomos.

Las bajas pérdidas del resonador permiten almacenar los fotones dentro de la cavidad durante casi una millonésima de segundo, cantidad de tiempo considerable en las escalas atómicas. Hemos estimado el número de fotones almacenados en nuestro resonador midiendo la cantidad de luz láser transmitida a través de uno de los espejos, para lo que usamos un detector muy eficaz que cuenta hasta el 40 por ciento de todos los fotones que le llegan.

La acumulación de fotones continúa hasta que la tasa de pérdidas por absorción y transmisión a través de los espejos iguala a la de emisión de los átomos de bario. Para variar la densidad de la corriente de átomos se ajustaba la temperatura del horno de bario. Cuando el promedio de átomos situados en la cavidad





era de 0,1, es decir, cuando no había en ella un átomo de bario más que el 10 por ciento del tiempo, la acumulación de fotones era mínima, pues la mayor parte de los fotones emitidos abandonaba el resonador antes de que llegase el átomo siguiente. Pero si se incrementaba a 0,4 el número promedio de átomos de la cavidad, se emitían alrededor de un millón de fotones por segundo, lo que permitía que siempre hubiese alguno en el resonador. Esta presencia aumentaba la probabilidad de emisión de nuevos fotones, de modo que, cuando el promedio de átomos subió a 0,7, la potencia del láser aumentó siete veces.

Láseres del futuro

El láser monoatómico es muy eficaz. A medida que se van almacenando fotones en el resonador, la probabilidad teórica de que los átomos de bario emitan otro fotón se acerca al cien por cien. La probabilidad de emisión de nuestro prototipo alcanzó un máximo del 50 por ciento, lo que significa que la mitad de la energía absorbida por los átomos de bario se convirtió en luz láser. La eficacia de la mayoría de los láseres corrientes va del 1 al 30 por ciento.

Pero el verdadero valor del láser monoatómico resulta de su utilidad como herramienta experimental. Como la luz del láser se genera por fenómenos mecanocuánticos, pueden someterse a comprobación las predicciones de la teoría cuántica estableciendo interacciones atómicas en el resonador y observando la respuesta que da el dispositivo. Nuestro primer láser no era el ideal para tales experimentos, puesto que las interacciones atómicas producidas en el resonador no eran uniformes. El campo electromagnético de la cavidad tenía la forma de una onda estacionaria entre los espejos, cuya amplitud subía y bajaba siguiendo una curva sinusoidal, como las vibraciones de una cuerda de piano tensa, por lo que las interacciones entre los átomos y la cavidad variaban según las trayectorias que los primeros llevasen: los que pasaban por áreas de amplitud grande emitían fotones, mientras que los que lo hacían por las de poca amplitud no resultaban afectados.

Hemos resuelto este problema desviando ligeramente el haz atómico respecto de la dirección que forma un ángulo de 90 grados con la orientación de los espejos. Debido al corrimiento Doppler, el átomo ya no “ve” el campo como una onda estacionaria sino más bien como un par de ondas que se mueven en direcciones opuestas. Puede ajustarse la distancia entre los espejos de tal manera que sólo una de ellas sea resonante con el átomo. Este ajuste torna más uniformes las interacciones atómicas, pues como todos los átomos atraviesan regiones de amplitud grande y pequeña de la onda viajera, pasan por el mismo campo y tienen la misma probabilidad de emitir un fotón.

Otro problema que tenía nuestro láser original era la amplia distribución de velocidades de los átomos de bario que emergen del horno. Los átomos más rápidos tienen menos tiempo para interactuar con el campo mientras atraviesan la cavidad, por lo que es más improbable que emitan fotones. Para conseguir velocidades más uniformes hemos modificado el método de excitación de los átomos de bario, irradiándolos con dos láseres normales para asegurar que sólo los átomos que tengan la velocidad deseada sean promocionados al estado de mayor energía.

Una vez realizadas estas mejoras, estamos ahora preparándonos para analizar el espectro de emisión del láser monoatómico. Experimentos previos han demostrado que un átomo que se encuentre dentro de una cavidad resonante interactuará con la luz de un láser habitual. Si la cavidad está vacía, la intensidad del haz que la atraviese aumentará mucho cuando ambos se encuentren en resonancia. Por decirlo de otra manera, la curva de sintonía de la cavidad no tiene más que un pico. Pero si hubiese un átomo dentro de la cavidad, serán dos las frecuencias a las que la intensidad del rayo láser transmitido aumente abruptamente, situadas por encima y por debajo respectivamente de la frecuencia de resonancia en vacío, presentando dos picos la curva de sintonía.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CAVITY QUANTUM ELECTRODYNAMICS. Serge Haroche y Daniel Kleppner en *Physics Today*, vol. 42, n.º 1, páginas 24-30; enero 1989.

THE MICROMASER: A PROVING GROUND FOR QUANTUM PHYSICS. G. Raithel et al. en *Cavity Quantum Electrodynamics*. Dirigido por Paul R. Berman. Academic Press, 1994.

THE MICROLASER: A FUNDAMENTAL QUANTUM GENERATOR OF LIGHT. Kyungwon An, Ramachandra R. Dasari y Michael S. Feld en *Atomic and Quantum Optics: High-Precision Measurements*, SPIE Proceedings Series, vol. 2799, páginas 14-21; 1996.

CIENCIA Y SOCIEDAD

El mildiu ataca de nuevo

El hongo que causó hambrunas en el pasado retorna vengativo

Una enfermedad vegetal llamada mildiu de la patata arrasó las plantaciones europeas de este tubérculo en 1845, provocando hambrunas históricas y llevando a la muerte por inanición a más de un millón de personas en Irlanda. Ahora, 150 años después, nuevas cepas agresivas de *Phytophtora infestans*, el hongo causante del mildiu de la patata, se están extendiendo rápidamente por todo el mundo. Las cepas son tan virulentas que, además de poder destruir una plantación en cuestión de días, son resistentes al metalaxyl, el único fungicida efectivo para mantener a raya la infección.

El hongo tiene su origen en el valle mejicano de Toluca y se presenta bajo dos formas, llamadas A1 y A2. Por razones mal comprendidas, la que salió de México a mediados del siglo diecinueve fue solamente A1, probablemente en alguna planta. La forma de luchar contra esta plaga ha consistido en la utilización conjunta de fungicidas y de la gestión integrada de plagas, un sistema que conjuga medios biológicos, culturales, físicos y químicos. Pero a principios de los años ochenta se comprobó que estaban aumentando mucho en Europa las pérdidas agrícolas relacionadas con *P. infestans*, al tiempo que se descubrían nuevas cepas formadas por hongos de los dos tipos.

Parece que este hecho pudiera ser precisamente el causante del reforzamiento de la enfermedad. A1 y A2 se reproducen asexualmente cuando se encuentran separados, pero si están juntos lo hacen sexualmente. Se sospecha que la reproducción sexual ha incrementado la variación genética, creando cepas insensibles a los potentes fungicidas y capaces de arrasar las defensas genéticas que pudieran tener las plantas infectadas. En las poblaciones asexuales pueden acumularse las mutaciones perjudiciales. Si durante los últimos cien años hubiese habido poca o ninguna inmigración y falta de recombinación sexual, las cepas más antiguas y aclimatadas pudieran haberse vuelto cada vez menos agresivas, con el resultado de que se vieran desplazadas por otras más exóticas y virulentas.



1. Las patatas infectadas presentan manchas rojizas y granulosas

Los biólogos creen que el tipo A2 llegó como polizón a Europa durante los años setenta, cuando se importaron grandes cargamentos de patata mejicana, que luego se reexportaron inadvertidamente al resto del mundo. Las cepas norteamericanas se han mostrado extraordinariamente prolíficas. US-8, que es la predominante ahora en los Estados Unidos, fue detectada en 1992 en un único condado del norte del estado de Nueva York. En 1994 ya se había extendido por otros veintitrés estados y por el este de Canadá.

No parece que sean las prácticas agrícolas descuidadas las que hayan desempeñado una función destacada en el desarrollo de las cepas. No son más de tres o cuatro las variedades de patata que dominan el 80 % del mercado, pero el mildiu ataca a cualquier tipo de patata, incluidos algunos silvestres. Tampoco parece que la administración de productos químicos se haya realizado indiscriminadamente, por lo menos en Estados Unidos. Las cepas ya eran resistentes al metalaxyl cuando llegaron allí y se han utilizado técnicas integradas, que no dependen excesivamente de un único fungicida.

El hongo, que necesita climas húmedos para desarrollarse, ha causado pérdidas medias anuales cercanas a los 14 millones de toneladas durante los últimos años, equivalentes a casi 3000 millones de dólares. La severidad de la plaga depende de la cantidad de lluvia caída y de la decisión con que los agricultores se enfrenten a ella, incluyendo el uso de medidas profilácticas.

Pero la utilización de fungicidas es cara, por no mencionar sus posibles repercusiones sobre la salud y el medio ambiente, por lo que los biólogos están buscando vías de solución diferentes. El Centro Internacional de la Patata, con sede en Lima, inició un programa mundial coordinado en 1996, contando con un presupuesto de 25,5 millones de dólares. Su propósito es desarrollar variedades de patata que resistan todas las formas de la enfermedad.

Los investigadores de México ya han obtenido patatas resistentes al mildiu, que están siendo cultivadas con éxito por miles de agricultores pobres



2. El hongo del mildiu de la patata tiene sáculos llenos de esporas, llamados esporangios, de unas 35 micras de largo

de varios países. Pero la producción de patatas genéticamente diseñadas para los grandes mercados comerciales es más problemática, pues no sólo tienen que resistir al mildiu, sino cumplir las exigencias de los consumidores, como pudieran ser tener cierto tamaño y determinado contenido de azúcares. El desarrollo de este tipo de patata requerirá todavía muchos años, por lo que los patólogos vegetales tienen que seguir en la brecha, proporcionando información a los agricultores e investigando las formas de tratamiento más adecuadas.

ROXANNE NELSON

Reconocimiento secreto

La importancia de los detalles

Los órganos genitales de los machos de los insectos poseen un gran número de piezas complicadas. Por poner un ejemplo, los términos que se utilizan para designar los de un solo grupo de ellos, el de los ortópteros (grillos, saltamontes y sus afines), incluyen falos, epiproctos, paraproctos, cercos, gonotremas e incluso titiladores ("cosquilleadores").

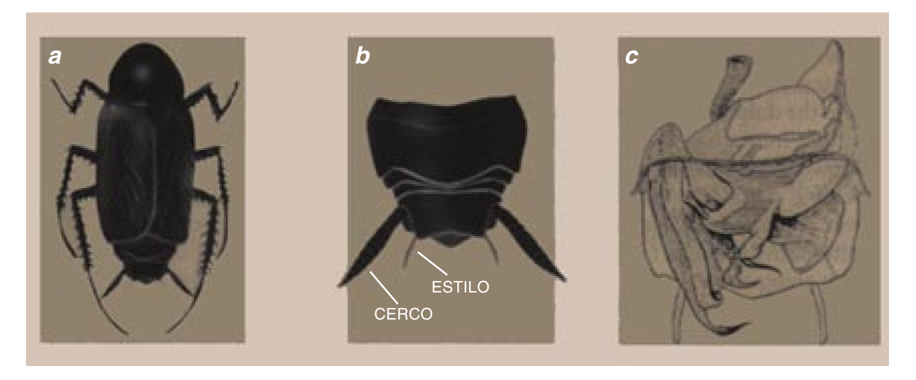
¿Cuál es la razón de que estos órganos se hayan vuelto tan complejos? Se han avanzado dos tipos de respuestas. Según el primero, la causa estaría en su funcionamiento como barreras a la inseminación, para evitar la producción de descendientes híbridos de baja calidad, dado que estas características masculinas son completamente identificatorias de la especie. En las zonas de superposición de especies, las "cerraduras" que son los genitales femeninos irían divergiendo, imponiendo así la selección darwiniana entre los machos conespecíficos, que serían los únicos que lograrían el ajuste adecuado de la "llave".

La segunda respuesta es que las estructuras genitales divergieron por causa de la selección sexual postinseminatoria que se produce en favor de cualquier dispositivo que aumente el éxito de la fecundación. Ejemplos posibles serían los "abrochadores", que sujetan a la hembra forcejeante hasta que se produce la inseminación, o los dispositivos titiladores, que transmiten "señales internas de cortejo" a la hembra. El esperma de los machos que proporcionasen las mejores señales se utilizaría con preferencia al que se encontrase almacenado procedente de los apareamientos previos, discriminación copulativa que las hembras favorecerían transmitiendo el rasgo genital ventajoso a su descendencia.

Göran Arnqvist ha sometido a contrastación rigurosa ambas hipótesis. El rigor está en los métodos que ha empleado, empezando por la medición geométrica de las divergencias estructurales, con lo que supera los inevitables problemas que plantea la evaluación subjetiva de la complejidad. Luego compara estas medidas de divergencia en pares de grupos de insectos que tienen un antepasado común y difieren en el modelo de apareamiento femenino. Un grupo contiene especies de las que se sabe que sus hembras no se aparean más que una vez (especies monándricas), mientras que las del otro lo hacen varias veces (especies poliándricas). Si la selección posterior a la inseminación fuese importante, los genitales deberían divergir más en los grupos poliándricos, puesto que la competencia entre los eyaculados de los rivales no puede darse más que cuando la hembra los acepte. Por el contrario, la hipótesis de la cerradura y la llave predice una mayor divergencia genital en las especies monándricas, debido al coste potencialmente grande que tendría para la hembra la realización de su única cópula con la especie equivocada.

Los resultados obtenidos apoyan de manera abrumadora la selección posterior a la inseminación. En casi todas las parejas analizadas (18 de 19) de efímeras, moscas, escarabajos y mariposas, la forma de los genitales masculinos de las especies de los grupos poliándricos ha divergido más que la de las especies que no se aparean más que una vez. Otro rasgo interesante es que la divergencia se produzca sólo en los órganos genitales y no en otras partes del cuerpo, como pudieran ser las patas.

¿Existen otras fuerzas selectivas que pudieran explicar la diferente forma de producirse la divergencia genital de los grupos monándricos y poliándricos? Después de todo, las diferencias entre ambos se refieren también a otros aspectos de su ciclo biológico, variables que no se tienen en cuenta en un estudio comparado



Aspecto dorsal de los complicados artilugios genitales de un macho de cucaracha negra o común, Blatta orientalis. *El estudio de las razones de tal complejidad la presenta como un resultado de la selección sexual en favor de los dispositivos genitales que otorguen preferencia fecundadora al esperma del macho que se está apareando, frente al almacenado de cópulas previas. Cucaracha completa* (a)*; zona genital ampliada* (b)*; morfología interna de los genitales masculinos* (c)

como el presente. Así, por ejemplo, las hembras monándricas tienden a tener una fecundidad menor que las poliándricas y copulan nada más emerger como adultas. Quizá no se necesiten artilugios muy complejos para emplear las partes reproductoras flexibles de una hembra que acabe de emerger y cuyo tegumento todavía no se haya endurecido. Pero es improbable que argumentos de este tipo proporcionen explicaciones generales de las pautas observadas.

Una hipótesis que sí pudiera hacerlo consistiría en la combinación de los dos prototipos considerados. Las especies cuyas hembras son poliándricas sufren costes de hibridación, una respuesta a los cuales pudiera ser una cierta selección posterior a la inseminación. En el caso de escarabajos, crisopas, moscas del vinagre, saltamontes y grillos es claro que no existe un mecanismo de aislamiento del tipo cerradura y llave: el esperma de individuos de una especie equivocada (o, en un caso, de una subespecie) puede abrirse camino hasta los órganos de almacenamiento de esperma de las hembras, e incluso fecundar los huevos con éxito. Pero esto no ocurre más que si es el único eyaculado presente, pues este esperma heteroespecífico suele perder la batalla si compite otro procedente de la misma especie que la hembra. Existen algunos indicios de que este resultado se debe en parte a la capacidad que tiene el tracto reproductor de la hembra para reconocer y favorecer al esperma de su propia especie. Cómo se logre tan críptica comunicación de la identidad específica es asunto no bien conocido.

He aquí la hipótesis alternativa. ¿Podría ser que las modificaciones de los genitales masculinos de algunas especies poliándricas incluyeran dispositivos que señalaran a la hembra que ésta está recibiendo esperma conespecífico (de forma similar a la manera en que se piensa que las estructuras genitales señalan la calidad de un macho conespecífico)? Vale la pena investigar esta idea, aun cuando no se trate de una explicación general. Por ejemplo, no explica por qué existen genitales divergentes cuando no hay peligro de un apareamiento equivocado, como en especies de islas aisladas o en parásitos que no comparten patrones con especies emparentadas. Para desentrañar la importancia de las señales (de cualquier tipo) que emiten los genitales sobre la evolución de la complejidad genitálica, necesitamos muchos más estudios experimentales y de observación en especies concretas.

Vale la pena señalar que Darwin, que era un entomólogo muy competente, conocía muy bien “los complejos apéndices del ápice abdominal de los insectos macho”, pensando que podían funcionar como dispositivos para sujetar a la pareja. También supo que la selección sexual puede producir oscuros rasgos genitales junto a estructuras mucho más aparentes y famosas, como la cola del pavo real. El hecho de que los genitales de los machos se encuentren sometidos a selección sexual enmascara ciertamente la dicotomía tradicional entre órganos reproductores primarios (los que liberan eyaculados) y las estructuras sexuales secundarias, como pudieran ser las colas vistosas. Darwin llegó a una conclusión parecida al considerar este tema, afirmando que “apenas es posible decidir cuál debiera denominarse primario y cuál secundario”.

DARRYL T. GWYNNE
De *Nature*

Un descubrimiento de peso

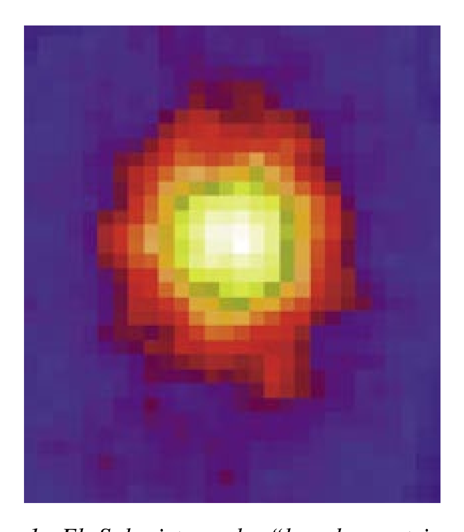
La masa de los neutrinos ofrece pistas sobre la naturaleza de las estrellas, de las galaxias y del universo entero

Quizás el año 1998 sea considerado en el futuro como aquel en que la física de partículas recuperó su interés. Los intentos de penetrar en la naturaleza íntima de la materia han consistido durante mucho tiempo en ensamblar un rompecabezas. El marco venía dado por el modelo estándar de la física de partículas, en el que se encajaban debidamente las dos docenas de partículas elementales conocidas. Cuando un verdadero ejército de casi mil físicos descubrió el quark cima en 1995, el rompecabezas parecía completo. Sólo quedaba una pequeña cuenta por saldar: confirmar que las tres partículas más ligeras —los neutrinos de electrón, muón y tau— no pesan absolutamente nada, según la predicción del modelo.

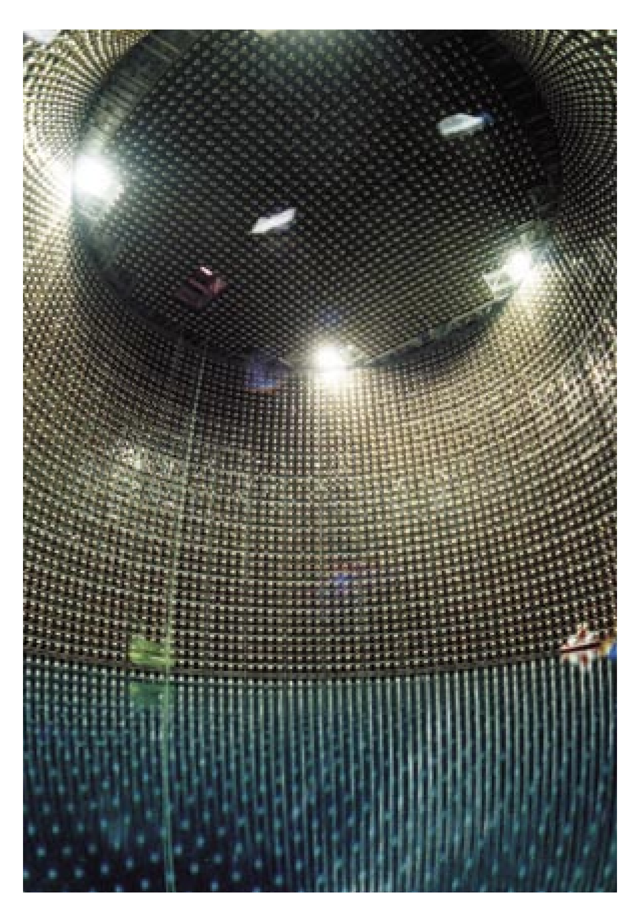
Pero en el mes de junio pasado los 120 físicos japoneses y americanos asociados en el Proyecto Super-Kamiokande presentaron pruebas convincentes de que al menos uno de ellos (y puede que todos) tiene un peso. Este hecho, aunque la masa sea ínfima, no puede pasarse por alto. Podría ayudarnos a entender la emisión de la luz solar, las explosiones de otras estrellas en brillantes supernovas y por qué las agrupaciones galácticas siguen ciertos patrones. Tal vez lo más importante sea, en palabras del físico Wolfenstein, que “una vez admitida la masa del neutrino, comprobamos que la verdad se encuentra más allá del modelo estándar”.

Casi todos los expertos en neutrinos han aceptado esta conclusión, porque los nuevos datos vienen respaldados por varios años de observaciones similares en otros detectores. En Princeton, John Bahcall, del Instituto de Estudios Avanzados, asegura estar plenamente convencido del resultado y manifiesta su entusiasmo.

La sutileza del neutrino es indudablemente sublime. Los quarks y los electrones no pueden pasar inadvertidos: son nuestra materia prima y la del mundo que nos rodea. El muón y el tau, parientes del electrón, no son tan familiares porque mueren apenas han nacido. En cambio los neutrinos nos rodean perennemente, aunque no sean perceptibles. Billones de neutrinos atraviesan el cuerpo del lector mientras se ocupa de estas líneas. Se estima que el número de neutrinos creados por la Gran Explosión, por las estrellas y por la colisión de los rayos cósmicos con la atmósfera terrestre es 600 millones de veces mayor que el de electrones y protones. “Bastaría con que su masa fuera de una décima



1. El Sol visto a la “luz de neutrinos” debería brillar teóricamente más de lo que se observa



2. Los tubos fotomultiplicadores que revisten el detector Super-Kamiokande registran las colisiones de neutrinos con moléculas de agua

de electronvolt [la de un electrón es de unos 500.000 eV] para que su masa total igualase a la de todo el universo visible", dice Joel Primack, de la Universidad de California en Santa Cruz.

Se toma 0,1 eV como masa probable de un neutrino de muón. Pero no es posible asegurarlo, dado que sólo por medios indirectos puede medirse el peso de partículas capaces de atravesar casi sin obstáculos nuestro planeta a velocidades próximas a la de la luz. En el proyecto Super-Kamiokande había que observar pacientemente una complicada cisterna enterrada a 700 metros bajo una montaña japonesa para detectar los débiles destellos emitidos en las ocasiones —extremadamente raras— en que un neutrino de electrón o de muón chocase con una molécula de agua del enorme depósito de 50.000 toneladas. Con el tiempo, las trazas dejadas por los neutrinos creados en la atmósfera comenzaron a adoptar una cierta disposición. Los neutrinos procedentes del norte llegaban en el número y proporción que se esperaba. "Incluso encontramos una traza más acusada hacia el este, producida por una conocida asimetría del campo magnético terrestre que crea más colisiones de rayos cósmicos en esa dirección", afirma Todd J. Haines del Laboratorio Nacional de Los Alamos. Pero los neutrinos de muón que venían del sur eran demasiado escasos.

Dos grandes grupos de físicos buscaron por separado explicaciones al fenómeno, descartando todas menos una: las tres clases de neutrinos no son partículas diferentes, al modo que lo son electrones y muones. La verdad es que cada neutrino contiene una combinación de tres estados de masa. La proporción en que se combinan puede variar a lo largo del recorrido del neutrino, de tal modo que un neutrino de muón creado sobre América del Sur se haya transformado en un neutrino de tau, más pesado, a la hora de llegar al detector de Japón. Por esta razón aparecían muchos menos neutrinos de muón en el depósito Super-Kamiokande: parte de ellos se habían transformado en otro tipo, que no podía detectarse.

No resulta fácil teóricamente concebir la posibilidad de que se tengan estados de masa sin poseer masa. Pero todo lo que de momento puede decir al respecto Henry Sobel, de la Universidad de California en Irvine, es que la diferencia entre la masa de los neutrinos de muón y la de la partícula en la que se mudan está entre 0,1 y 0,01 eV, si bien en ningún caso es cero.

Como señala Wolfenstein, esto no resuelve los problemas de los neutrinos solares. El más desconcertante es que no se detecten más que la mitad de los neutrinos de electrón que teóricamente deberían caer del Sol a la Tierra. Pero, según Bahcall, ello refuerza la convicción, compartida por casi todos los que se dedican a este tema, de que la explicación de las anomalías de los neutrinos solares está en las oscilaciones de tales partículas de un estado a otro durante su trayecto hacia la Tierra.

Tal vez la clave para resolver otra contradicción astrofísica esté en la existencia de estas pequeñísimas partículas, los neutrinos dotados de masa. En efecto, son muchas y muy distintas las pruebas que indican que el universo encierra unas diez veces más materia que la detectada por los instrumentos de que disponemos. Quizá los neutrinos puedan rellenar una parte de este vacío de materia.

¿Es suficiente el peso de los neutrinos para influir apreciablemente en el destino del universo y en la composición de la materia? No es posible saberlo. Steven Weinberg, uno de los arquitectos del modelo estándar y profesor de la Universidad de Texas, rechaza que puedan construirse teorías sin disponer de datos más firmes sobre las masas y las amplitudes de las transiciones. Todavía se está muy lejos de ello, pero hay previstos importantes experimentos adicionales que podrían responder a esas preguntas.

El próximo enero va a crearse un haz de neutrinos de muón en un acelerador cercano a Tokio, que se enfocará hacia el detector Super-Kamiokande. De aquí a unos años se espera poder lanzar miríadas de estas partículas desde el Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi en Batavia, Illinois, hacia un detector enterrado en un túnel de una mina de Minnesota. Experimentos controlados de este tipo pudieran terminar por llenar los últimos huecos del modelo estándar y, si la suerte acompañase, descubrir que no es más que un fragmento de un panorama mucho más amplio y fascinante.

W. WAYT GIBBS

Los cucos son muy cucos

Historia de un abuso

Los niños que lloran a gritos afligen a sus sufridos padres. Pero considérese el sino de la pareja de pájaros que invierte semanas en la construcción del nido y en prepararse para criar a su propia pollada, para terminar burlada y cuidando de un intruso glotón. Este es el destino de las víctimas del cuco o cuclillo, *Cuculus*



Pollo de cuco alimentado por su progenitor adoptivo, un carricero común

canorus. Los cucos son parásitos de incubación: en lugar de construir sus propios nidos, ponen los huevos en los de otras especies, fiando en los confiados padres adoptivos para que incuben el huevo y alimenten al pollo hasta que éste pueda volar. Pero, ¿por qué lo toleran los anfitriones? Esta es la historia siniestra e improbable que han relatado recientemente Nicholas Davies y sus colaboradores en los *Proceedings of the Royal Society*.

Los autores se ocupan de la astuta lucha que se desarrolla entre el cuco y una de sus especies patrón, el carricero común, *Acrocephalus scirpaceus*. Estudiaron una población reproductora de unas 300 parejas de carricero común de los alrededores de Wicken Fen, cerca de Cambridge, Inglaterra. Los carriceros sufren a los cuclillos. Hay años en los que cerca de la cuarta parte de sus nidos están parasitados, aunque haya otros en los que el porcentaje sea muy pequeño. Las hembras de cuco ponen furtivamente un único huevo en uno de estos nidos cuando no está vigilado por sus dueños. Los carriceros comunes adultos rechazan los huevos que no se parecen a los suyos y la selección natural ha afinado sus facultades de discriminación. Pero en esta carrera armamentística coevolutiva el cuco también ha ido evolucionando para que sus huevos imiten a la perfección a los de sus anfitriones, que suelen aceptarlos e incubarlos.

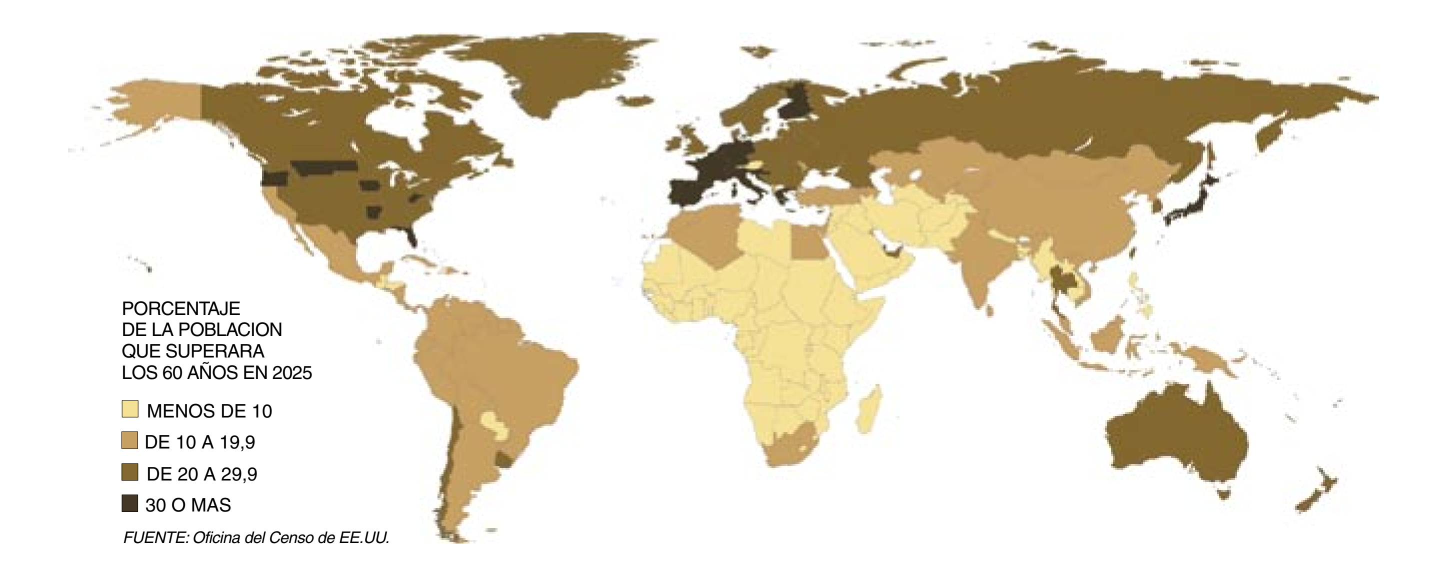
Resulta sorprendente que no se produzca un claro rechazo de los pollos de cuco, dado lo diferentes que son de los de carricero. No sólo es que el impostor pase desapercibido, sino que expulsa del nido a los restantes huevos y pollos auténticos, mientras que los padres adoptivos suelen observar impotentes la operación. Resulta desconcertante que los patrones toleren a estos asesinos natos, pero hay razones teóricas según las cuales el reconocimiento de los pollos de cuco pudiera ser contraproducente para los carriceros. Si los padres adoptivos que criasen por primera vez recibieran la impregnación equivocada de un pollo parásito, volviéndose incapaces de reconocer a sus futuros pollos como propios, los costes del reconocimiento de los volantones podrían superar a los beneficios en términos de éxito reproductor a lo largo de la vida.

Sea como sea, la verdad es que los pollos de cuco son más que tolerados. Aunque a los padres adoptivos se les presente una sola boca abierta y no el habitual nido lleno de los gaznates expectantes de sus propias crías, se esfuerzan por proporcionar al voraz pollo de cuco un abundante suministro de orugas y de insectos, lo que conduce a su rápido crecimiento. Resulta grotesco que el carricero común termine empequeñecido por el pollo al que está alimentando (*véase la figura*).

Para averiguar de qué manera logran estimular los cucos a sus padres adoptivos para que les proporcionen tanta comida, se emplearon algunos hábiles trucos. La comprobación de si basta el tamaño grande para desencadenar tasas de aprovisionamiento elevadas se realizó sustituyendo temporalmente las polladas de carriceros comunes por un único pollo de mirlo común (*Turdus merula*) o de zorzal común (*Turdus philomelos*). Los nuevos pollos también fueron aceptados, pero se les suministró menos comida que a los de cuco de masa corporal parecida, de modo que el tamaño por sí solo no es la clave.

Puede que los pollos de cuco no sean más que pedigüeños expertos. Su llamada de solicitación es insólita, pudiendo describirse como un "*si, si, si, si...*" continuo y rápido. Esto es muy distinto del canto de solicitación del pollo de carricero común, pero se parece mucho al ruido que hace todo un nido de ellos. Los sonogramas de registros de pollos a los que se induce a solicitar bajo determinadas condiciones controladas de laboratorio confirmaron que la llamada de un único pollo de cuco hambriento se parece a la de toda una pollada media de carricero común, por lo que el engaño sonoro pudiera ser una explicación verosímil del ritmo de aprovisionamiento acelerado que consigue el pollo de cuco. Pero el argumento decisivo fue un experimento de campo en el que se utilizaron altavoces para emitir las llamadas de solicitación del cuco y las de polladas enteras de carricero común a nidos que no contenían más que un único pollo de mirlo común y de zorzal común. Esta sencilla y elegante treta hizo que los padres adoptivos aumentasen su ritmo de aprovisionamiento hasta alcanzar el correspondiente a un pollo de cuco.

Estos resultados proporcionan un magnífico ejemplo de explotación sensorial. Quedará para investigaciones futuras la explicación de por qué los padres adoptivos no se dan cuenta del engaño. Puede que todo se reduzca a que se encuentran en desventaja en la carrera armamentística evolutiva con el cuco. Richard Dawkins ha hecho notar que, en última instancia, todos



los cucos pertenecen a un linaje continuo de parásitos que han triunfado, mientras que no todas las parejas de carriceros comunes resultan víctimas de un cuco.

RORY HOWLETT
De *Nature*

Un futuro de ancianos

Aumenta el número de personas mayores

Para ver el futuro de la población mundial basta con mirar a Europa, donde el índice de natalidad es bajo y el número de personas mayores está creciendo de manera espectacular. En Alemania, por ejemplo, las personas con más de sesenta años de edad constituyen actualmente el 22 por ciento de la población, mientras que en el año 2025 representarán un 35 por ciento, la mayoría mujeres. Se prevé además que, debido a la continuación de la escasa fertilidad, su población total disminuya en un ocho por ciento hasta 2025.

Alemania, el resto de las naciones europeas occidentales y Japón constituyen la avanzadilla de los cambios demográficos históricos que acompañan al desarrollo de las sociedades tecnificadas. Si la economía mundial siguiese aumentando los niveles de vida en el futuro, es probable que los países en vías de desarrollo reproduzcan el modelo europeo, tendiendo hacia grandes poblaciones de ancianos y una fertilidad reducida. Es menos probable que sigan la experiencia americana, que es bastante atípica debido, entre otras razones, al enorme influjo continuo de inmigrantes. Los inmigrantes constituyen un factor decisivo del incremento de la población estadounidense según las predicciones realizadas hasta el año 2025. El aumento será del 24 % y en dicha fecha los sexagenarios y las personas aún más mayores constituirán el 25 por ciento de la población, en comparación con el 31 por ciento de los países de Europa Occidental.

La cuestión de si el mundo puede permitirse prestar una atención adecuada a los ancianos lleva preocupando más de un siglo y sigue siendo un tema vidrioso de las relaciones intergeneracionales. En unas declaraciones que se cuentan entre las más provocadoras de los últimos años, Lester C. Thurow, economista del Instituto de Tecnología de Massachusetts, afirmó que las exigencias de servicios sociales de los americanos de más edad amenazan la inversión de la que depende el futuro de la sociedad. Que tal pesimismo esté o no justificado se deberá a imponderables como pudieran ser las tendencias futuras de la productividad laboral, de la longevidad y de los índices de discapacidad. El panorama podría variar si se adoptasen soluciones imaginativas, de las que nuevas formas de empleo de las personas mayores en el cuidado de los incapacitados pudieran servir de ejemplo. Como justificación de los presagios pesimistas se cuenta la probabilidad de que los abundantes niños nacidos en los años sesenta vayan agobiando cada vez más los servicios sociales conforme lleguen a la edad de su jubilación, después del 2010, al menos en los Estados Unidos.

Pero hay motivos para el optimismo, entre los que se cuenta un reciente informe según el cual los índices de incapacitación de los norteamericanos mayores de 65 años disminuyeron entre 1982 y 1994. Estas dolencias de los últimos años de la vida podrían reducirse todavía más, si disminuyeran los porcentajes de enfermedades crónicas no mortales, como la artritis, el dolor de espalda, las migrañas, la depresión y la osteoporosis. Las victorias sobre las enfermedades letales, como el cáncer y las cardiopatías, prolongan la vida, pero no conducen sin más a una vejez sana, porque las personas siguen siendo propensas a enfermedades crónicas no mortales.

Si la Organización Mundial de la Salud alcanzase su propósito de eliminar las enfermedades infecciosas, o al menos el de mantenerlas a raya, daría un gran impulso a la consecución de una vida satisfactoria para las personas de los países en desarrollo, pues dichas enfermedades son en ellos una de las causas principales de discapacidad. Las inversiones realizadas en investigación biomédica básica, como el Proyecto Genoma Humano, contribuirán con toda probabilidad al mejor conocimiento de las enfermedades, lo que tendrá como consecuencia una reducción de los porcentajes de incapacitación. Es muy posible que la mayor influencia a este respecto la tengan los niveles crecientes de prosperidad y de educación que se anticipan para el próximo siglo.

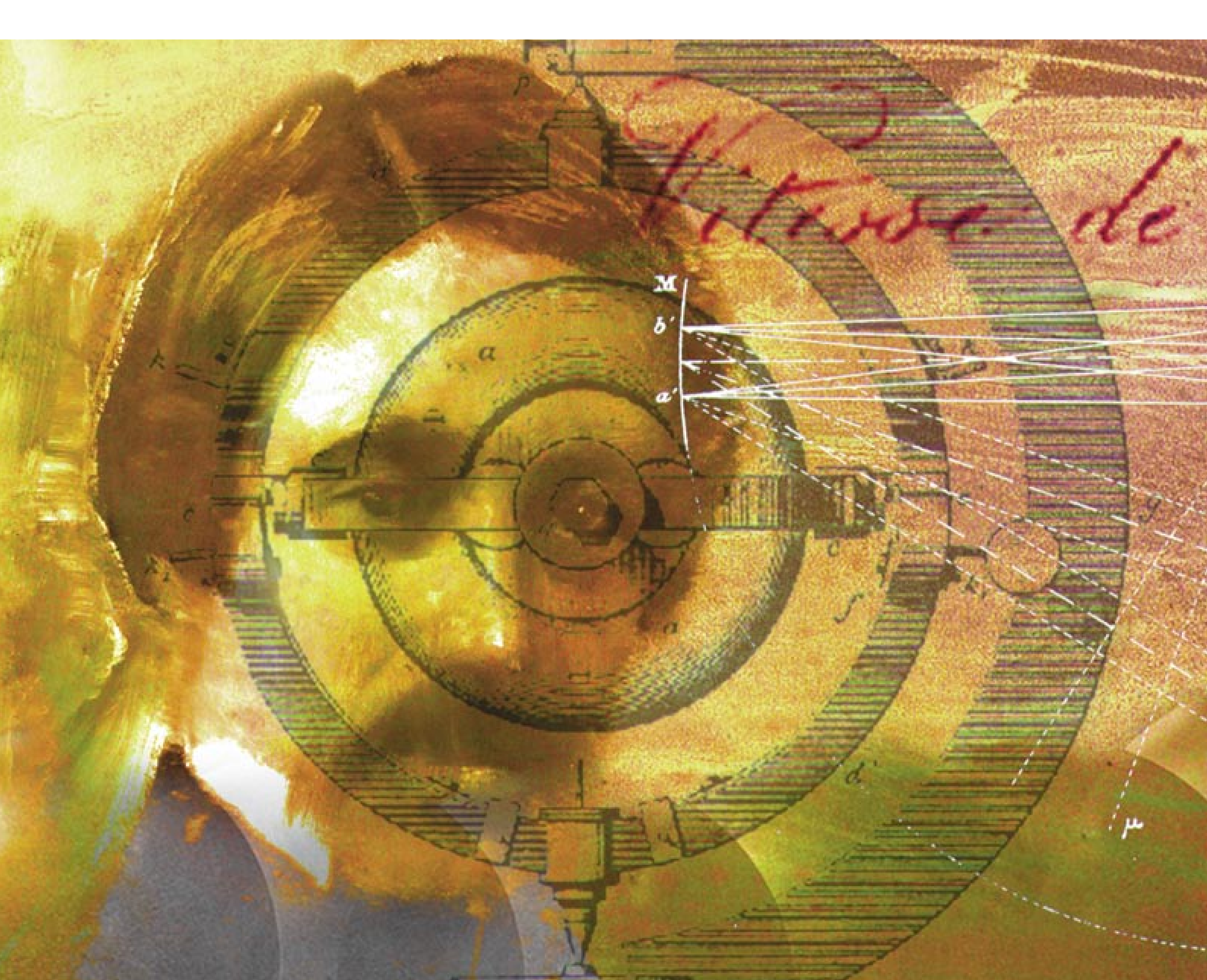
RODGER DOYLE

Léon Foucault

Célebre por su experimento del péndulo de 1851, Foucault presentó pruebas definitivas contra la teoría corpuscular de la luz, inventó el giroscopio, perfeccionó el telescopio reflector y midió la distancia al Sol

William Tobin

Hacia 1850 los físicos sabían de sobra que la Tierra gira sobre su eje, pero seguía sin encontrarse la prueba decisiva que se buscaba desde hacía mucho tiempo. Merced a los trabajos de Galileo y de Newton se sabía que la rotación de la Tierra tendría que influir sobre el movimiento de los objetos terrestres (vistos por observadores situados sobre el suelo), de la misma manera que el giro del carrusel influirá sobre el salto de un caballo a otro que intente hacer un niño. Durante más de doscientos años los filósofos naturales se habían esforzado por desvelar tal fenómeno, dejando caer objetos desde lo alto de torres o arrojándolos al fondo de pozos. Habían considerado incluso la posibilidad de disparar verticalmente un cañón, con la esperanza de detectar pequeñas desviaciones de la trayectoria del proyectil respecto de la vertical, que habrían proporcionado pruebas adicionales de la rotación de la



Tierra. Pero todos sus esfuerzos resultaron vanos.

Hasta que en 1851 un joven físico francés asombró al mundo. Léon Foucault demostró que la oscilación continua y periódica de un simple péndulo acumulaba los minúsculos efectos de la rotación de la Tierra. Como pudieron observar los testigos presentes en el Panteón de París, el plano de movimiento del péndulo de Foucault giraba lentamente en sentido dextrógiro, poniendo de manifiesto la rotación levógira de la Tierra situada debajo. El experimento causó sensación. Por fin se disponía de una prueba dinámica directa de que la Tierra giraba realmente sobre su eje.

Aunque Foucault haya pasado a la posteridad gracias a su péndulo, hizo muchas otras contribuciones notables a la ciencia del siglo XIX, como fueron aportar pruebas irrefutables contra la teoría corpuscular de la luz, inventar el giroscopio (que proporcionó más pruebas de la rotación de la Tierra), perfeccionar el telescopio reflector y medir la distancia al Sol. Su obra, que combina de manera fascinante los caracteres puro y aplicado, merece atención por la extraordinaria precisión y perspicacia que revela. Es curioso notar que mientras algunos de sus colegas le consideraron el físico francés más eminente de su tiempo, otros no le tenían más que por persona habilidosa e inspirada.

Virtuosismo manual

Jean-Bernard-Léon Foucault nació en París en 1819 y, aparte de algunos años de infancia en la Bretaña, pasó toda su vida en esa ciudad, donde murió en 1868. Su padre era un editor y librero conocido por sus volúmenes de historia de Francia. Los Foucault, una familia acomodada con varias propiedades, pudieron enviar al joven Léon al Colegio Stanislas, una prestigiosa escuela secundaria. Parece que Foucault, un adolescente de salud delicada, fue un estudiante mediocre que precisó un profesor particular.

WILLIAM TOBIN empezó a interesarse por la vida de Léon Foucault hace más de diez años, mientras trabajaba en el Observatorio de Marsella, donde se conserva el mayor telescopio de Foucault. Tobin se licenció en física por la Universidad de Cambridge y se doctoró en astronomía por la Universidad de Madison-Wisconsin. Actualmente es profesor de astronomía en la Universidad de Canterbury (Nueva Zelanda). Su investigación astrofísica se centra en las estrellas variables y las nubes de Magallanes. Trabaja en una biografía de Léon Foucault y redactó el presente artículo durante un año sabático en el Instituto de Astrofísica de París.

Foucault tenía, sin embargo, un gran don: sus manos. De joven se pasaba las horas construyendo modelos de barcos, telégrafos y máquinas de vapor. Confiando sacar partido de su destreza, se matriculó en la escuela de medicina de París en 1839, con la idea de llegar a cirujano, pero la desagradable visión de la sangre pronto le hizo abandonar la medicina.

A Foucault le entusiasmó entonces la daguerrotipia, la primera forma práctica de fotografía, en la que las imágenes se registraban en placas de plata yodurada, que se revelaban con vapor de mercurio. Aunque revolucionario, el procedimiento tenía una desventaja: las exposiciones podían fácilmente durar una hora. Hyppolyte Fizeau, que había sido compañero suyo de clase en el Colegio Stanislas, descubrió en 1841 que el bromo sensibilizaba las placas y Foucault desarrolló una técnica para la aplicación uniforme de ese vapor tóxico. Esta mejora redujo enormemente el tiempo de exposición, haciendo posible el retrato.

Foucault y Fizeau tenían mucho en común. Habían nacido con cinco días de diferencia y ambos abandonaron los estudios de medicina por la física. Poco después de sus trabajos con el bromo, empezaron a colaborar. En 1844 y a petición de François Arago, secretario de la Academia de Ciencias francesa y director del Observatorio de París, consiguieron



1. A LEON FOUCAULT (1819-1868) se deben progresos importantes de la ciencia del siglo XIX. Aunque algunos de sus colegas lo considerasen el mayor físico francés de su tiempo, sus críticos lo tenían por un diletante.

el primer daguerrotipo del Sol. La imagen mostraba con claridad que el disco solar era más brillante en el centro que en los extremos, lo que venía a confirmar las observaciones visuales y a refutar la idea del astrónomo y físico holandés Christiaan Huygens de que el Sol era una bola líquida.

Foucault exploró también las aplicaciones médicas de la daguerrotipia junto con Alfred Donné, uno de sus profesores de medicina, quien estaba estudiando al microscopio la leche y otros fluidos corporales. En 1845 publicaron un atlas de 80 microfotografías, la mayoría tomadas por Foucault, que representó la primera utilización de esta técnica fotográfica con fines médicos.

Donné era corresponsal para el *Journal des Débats*, un influyente periódico de París, de las reuniones que celebraba los lunes la Academia de Ciencias, papel en el que le sucedió Foucault ese mismo año. Donné había atacado a Arago en sus artículos por hacer de la academia un feudo personal. Sin ser tan franco, las críticas de Foucault fueron con frecuencia afiladas; se encargó de esta sección con cierta regularidad durante más de 15 años.

¿Ondas o partículas?

El primer descubrimiento importante de Foucault se produjo en 1850, cuando aportó pruebas indiscutibles al viejo debate sobre la naturaleza de la luz. La teoría ondulatoria de Robert Hooke y de Christiaan Huygens había ganado terreno desde principios del siglo XIX respecto a la hipótesis corpuscular de René Descartes y de Isaac Newton. Los descubrimientos de la interferencia y de la polarización habían proporcionado pruebas convincentes a favor de las ondas luminosas, pero los partidarios de la hipótesis corpuscular siempre lograban retocar su teoría de forma que concordase con los resultados experimentales.

Se requería una prueba decisiva y Arago la ideó. Cuando la luz pasa del aire al agua, los rayos se refractan, se tuercen, en la zona de contacto entre ambas sustancias. Las dos teorías explicaban el fenómeno de forma muy distinta. Según la teoría corpuscular, las partículas de luz se aceleran en la superficie de separación, de manera que viajan más deprisa en el agua que en el aire. La hipótesis ondulatoria, que afirma la continuidad del frente de onda,

Velocidad de la luz en el aire y en el agua

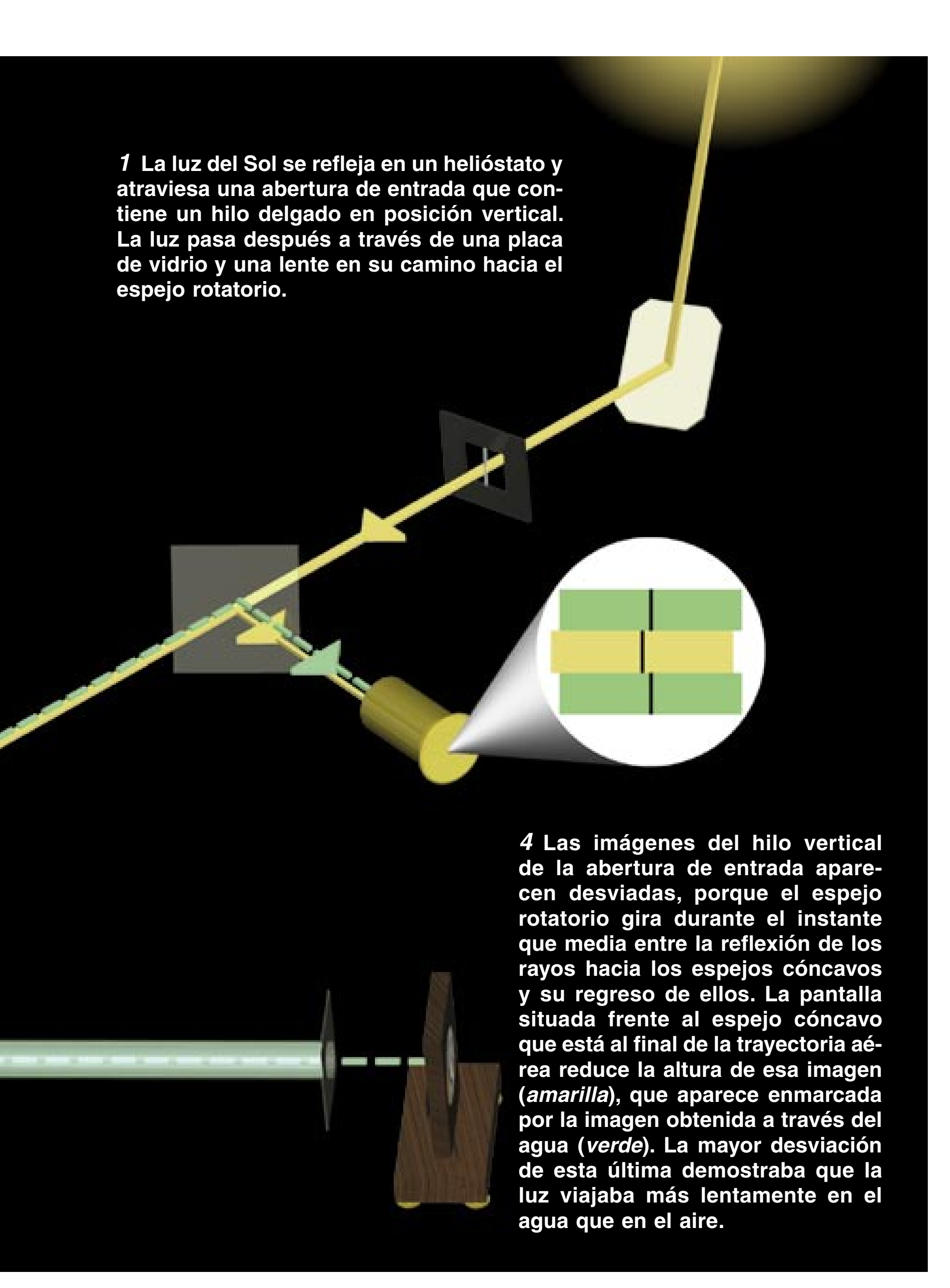
Léon Foucault demostró en 1850 que la luz viaja más rápidamente en el aire que en el agua, contradiciendo la teoría corpuscular. El diagrama esquematiza el experimento, en el que el tubo de agua medía tres metros, el diámetro del espejo rotatorio era de 14 milímetros y la abertura de entrada tenía dos milímetros cuadrados. El experimento le llevó a Foucault más tiempo del previsto, pues sólo los rayos de sol eran lo bastante intensos para que se les pudiera ver después de atravesar el agua, resultando que el cielo estuvo siempre nublado en París durante la primavera de aquel año. —*W.T.*

2 **Un espejo que gira rápidamente, movido por una turbina de vapor, refleja la luz por dos trayectorias de igual longitud, una a través del aire (*trayectoria superior*), la otra a través de agua (*trayectoria de la derecha*). Espejos cóncavos situados al final de ambas vuelven a reflejarla hacia el espejo rotatorio. El rayo que ha atravesado el agua**

3 **Los dos rayos de luz procedentes del espejo rotatorio regresan por la trayectoria inicial, hasta que encuentran la placa de vidrio, que los refleja hacia un visor.**



2. EL ESPEJO ROTATORIO fue un aparato decisivo para Foucault. Además de usarlo en el experimento representado en el diagrama superior, lo utilizó en 1862 para medir la velocidad de la luz y la distancia al Sol. El instrumento que muestra esta fotografía es el que usó en tales experimentos. Primero hacía girar el espejo con vapor, pero luego usó el aire comprimido de unos fuelles especiales, suministrados por un prolífico constructor de órganos vecino suyo. Este aparato se conserva en el Observatorio de París. El huso que sostiene el espejo sigue estando perfectamente equilibrado y gira con tanta suavidad como lo debió de hacer en manos de Foucault.



1 **La luz del Sol se refleja en un helióstato y atraviesa una abertura de entrada que contiene un hilo delgado en posición vertical. La luz pasa después a través de una placa de vidrio y una lente en su camino hacia el espejo rotatorio.**

4 **Las imágenes del hilo vertical de la abertura de entrada aparecen desviadas, porque el espejo rotatorio gira durante el instante que media entre la reflexión de los rayos hacia los espejos cóncavos y su regreso de ellos. La pantalla situada frente al espejo cóncavo que está al final de la trayectoria aérea reduce la altura de esa imagen (*amarilla*), que aparece enmarcada por la imagen obtenida a través del agua (*verde*). La mayor desviación de esta última demostraba que la luz viajaba más lentamente en el agua que en el aire.**

predecía que la velocidad en el agua sería menor. Así pues, la cuestión de la naturaleza de la luz podría dirimirse —o eso pensaba Arago— comparando las velocidades de la luz en el aire y en el agua.

El problema, naturalmente, era la enorme velocidad de la luz. La idea de Arago requería trayectorias paralelas en el aire y en el agua, que fuesen recorridas por luz emitida por una única fuente. Al final de ambos trayectos, un espejo que girase rápidamente reflejaría los dos rayos. El rayo más lento, que llegaría más tarde, sería reflejado con un ángulo mayor. Arago hizo la prueba con un espejo que giraba 2000 veces por segundo impulsado por un mecanismo de relojería, pero tuvo problemas para diferenciar los rayos reflejados, que se desplazaban muy rápidamente. Poco después la diabetes afectó a su vista, obligándole a abandonar los experimentos.

Foucault y Fizeau tomaron el relevo. Se dieron cuenta de que los rayos reflejados serían estacionarios —y observables— si se usaban espejos cóncavos para hacerlos retornar al espejo rotatorio, de forma que, tras reflejarse de nuevo en él, fueran a parar a un visor fijo, como indica la ilustración. Fue entonces cuando se produjo la ruptura entre quienes habían colaborado con tanto éxito durante casi un decenio, sin que sepamos a ciencia cierta por qué; quizá fuese por una discusión sobre la mejor forma de hacer girar el espejo. El carácter intransigente de Foucault contribuiría sin duda a ello. Donné escribiría más tarde: “Foucault no era lo que se dice simpático; no tenía ni la flexibilidad de carácter ni el deseo de complacer necesarios para que los demás le considerasen una persona agradable.” En cualquier caso, Foucault y Fizeau siguieron trabajando con independencia, tratando cada uno de ellos de ser el primero en sacar provecho de la idea de Arago. Fizeau siguió usando el mecanismo de relojería, mientras que Foucault usó una pequeña turbina de vapor para hacer girar su espejo a 800 revoluciones por segundo.

Ya es sabido que los físicos se darían cuenta más adelante de que el experimento de Foucault no era tan decisivo como parecía. La demolición de la teoría corpuscular no significó que las ondas proporcionaran una descripción completa del comportamiento de la luz. Sería necesaria la mecánica cuántica para explicar fenómenos como el efecto fotoeléctrico, la radiación del cuerpo negro o el láser.

La inspiración de un torno

El siguiente logro de Foucault fue el más celebrado. La inspiración para el experimento le llegó cuando, al hacer vibrar una varilla de acero fijada al mandril de un torno, se dio cuenta de que, aunque la varilla girase, el plano de vibración no lo hacía. Este efecto, que aún hoy resulta sorprendente (*véase la ilustración 3*), se debe a que la inercia mantiene el movimiento de los objetos a menos que actúe sobre ellos una fuerza externa. Percibiendo la analogía entre el torno y la varilla, de un lado, y la Tierra y un péndulo, del otro, Foucault dedujo que la rotación de la Tierra se manifestaría a los observadores situados sobre ella por el lento viraje del plano de oscilación del péndulo.

Trabajando en el sótano de la casa que compartía con su madre, construyó un primer péndulo con una esfera de latón de 5 kilogramos, suspendida de un cable de 2 metros. Durante el primer intento, el 3 de enero de 1851, el cable se rompió. Pero cinco días después tuvo éxito: el plano de oscilación de su péndulo giraba.

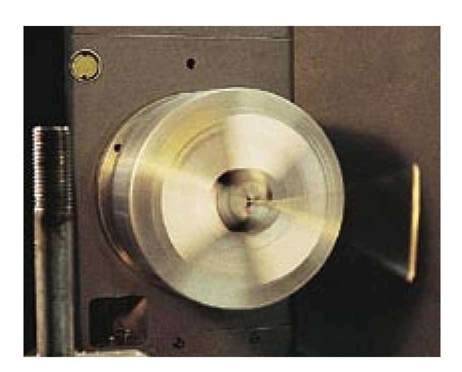
Invitado por Arago, Foucault instaló un péndulo con un cable de once metros en el Observatorio de

París. Al anunciar su descubrimiento a la Academia de Ciencias de París, algunos días después, Foucault afirmó que el plano de oscilación del péndulo presentaría un viraje aparente de 360 grados por día en los polos geográficos de la Tierra, mientras que en otros lugares disminuiría según el seno de la latitud, de forma que sería nulo en el ecuador. Foucault escribió que para derivar el factor seno "debe recurrirse al análisis o a consideraciones de mecánica y de geometría que exceden los límites de esta nota".

Con el apoyo del presidente de la República, Louis-Napoléon Bonaparte (el futuro emperador Napoléon III), el tamaño del péndulo volvió a aumentar para la realización de una espectacular demostración pública. Los ciudadanos de París acudieron en masa durante la primavera de 1851 a contemplar las oscilaciones de una esfera de 28 kilogramos suspendida de un cable de 67 metros bajo la imponente cúpula del Panteón. El avance del plano de oscilación del péndulo se hacía aparente mediante un estilo fijado bajo la esfera, que surcaba montones de arena húmeda situados en los extremos de su recorrido. La resistencia del aire amortiguaba gradualmente la oscilación, por lo que el péndulo tenía que recibir nuevo impulso tras cinco o seis horas de funcionamiento. Pero durante ese tiempo el plano de oscilación había virado 60 o 70 grados en sentido horario, como era de esperar. El experimento se reprodujo en todo el mundo. En Río de Janeiro, al otro lado del ecuador, el plano de oscilación viraba levógiramente, como se había predicho.

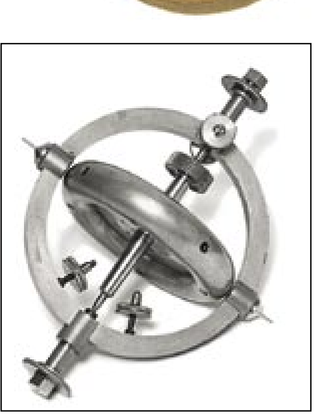
Foucault fue lo bastante listo como para no intentar justificar públicamente el factor seno. Decenas de sabios intentaron explicar geométrica y analíticamente el movimiento del péndulo durante los meses sucesivos y, en general, los defensores de un método criticaron acerbamente las interpretaciones de los partidarios del otro. La razón de que aparezca el factor seno es que el péndulo no es del todo libre para oscilar en el espacio; excepto en los polos geográficos, su punto de suspensión recorre un círculo y la dirección de la gravedad cambia constantemente con la rotación de la Tierra. En consecuencia, el péndulo sigue a las estrellas fijas (*véase el recuadro*). En términos analíticos, el viraje resulta de la fuerza de Coriolis, que aparece en los sistemas de referencia que giran, y es la misma fuerza que origina el empuje lateral que experimenta quien salte en un carrusel.

El viraje del péndulo no le planteaba a Foucault ningún problema filosófico: indicaba la naturaleza absoluta del espacio. Algunas decenas de años después, el físico Ernst Mach criticaría este punto de vista, especulando con la posibilidad de que fueran las estrellas fijas las que produjeran la inercia y establecieran los sistemas de referencia no acelerados, o "inerciales", que permitían medir aceleraciones y rotaciones. Mach pensaba que un planeta no podría girar en un universo que estuviese completamente vacío y que un péndulo de Foucault no viraría en tal planeta.

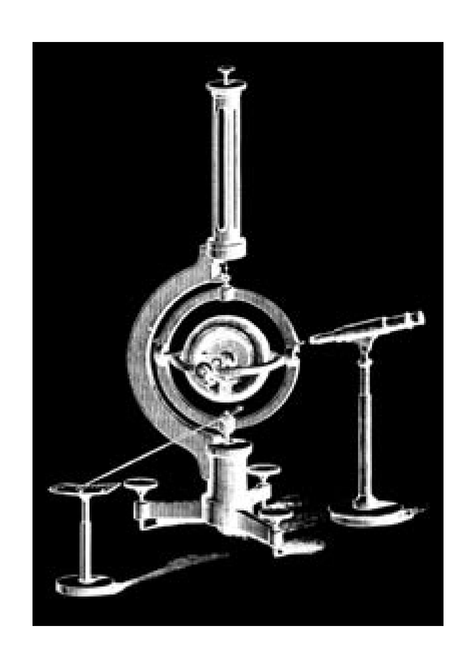




3. LA ROTACION DE LA TIERRA centró la atención de Foucault entre 1851 y 1852. La idea del péndulo se le ocurrió al observar la vibración de una varilla fijada al mandril de un torno en movimiento (*arriba*). Aunque la varilla gire con el torno, el plano de vibración permanece fijo, porque no actúa ninguna otra fuerza que lo cambie. Foucault, que entonces tenía 31 años (*centro*), percibió la analogía del torno y la varilla con la Tierra y un péndulo (*página opuesta*). Para demostrar la rotación de la Tierra fue también para lo que inventó el giroscopio (*abajo a la izquierda y centro*). La lenta deriva del rotor podía observarse con un microscopio (*abajo a la derecha*).





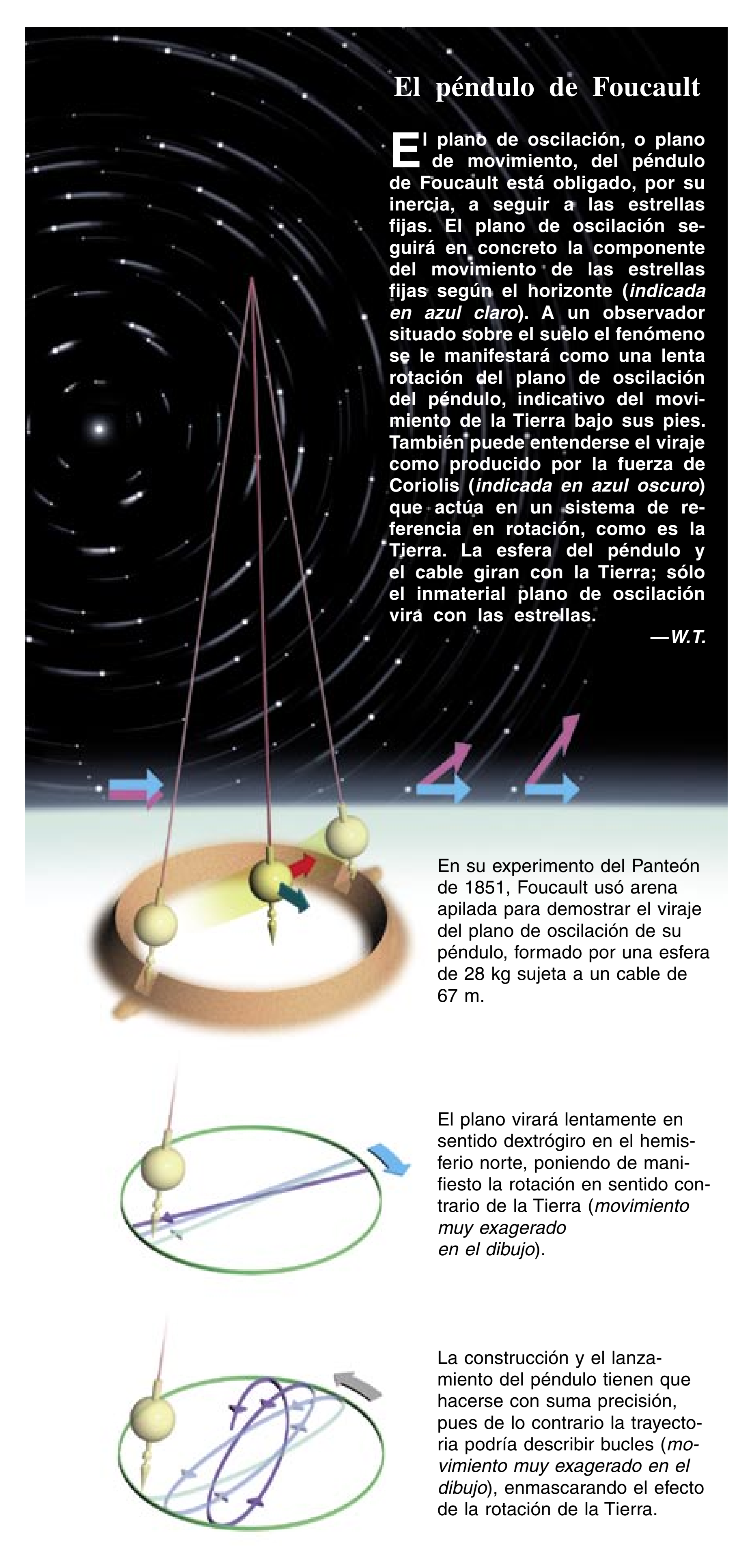


La ideas de Mach ejercieron una influencia considerable sobre Albert Einstein, pero la teoría de la relatividad general siguió un curso medio. Sus sistemas de referencia inerciales no se extienden indefinidamente a través del espacio (siendo válidos sólo localmente), pero en ellos la rotación es absoluta. Según la relatividad general, sin embargo, un cuerpo en rotación, como lo es un planeta, arrastrará levemente consigo al sistema de referencia, de manera que no sería necesario que un péndulo de Foucault estuviese tan firmemente atado a las estrellas fijas. Este arrastre circular del sistema de referencia —conocido también como efecto Lense-Thirring— alcanza aproximadamente la quinta parte de un segundo de arco al año en los polos de la Tierra, habiéndosele podido medir recientemente mediante aparatos láser situados en satélites.

Dada la confusión y los malentendidos generados por el factor seno, Foucault se centró en poner de manifiesto los movimientos que fuesen independientes de la latitud. Un año después construyó el aparato necesario, al que llamó giroscopio. El eje de su giroscopio rotatorio era completamente libre de mantener su orientación en el espacio y su lento virar con respecto a la Tierra podía observarse al microscopio. Los giroscopios mecánicos prestarían servicios inestimables a la topografía y a la navegación durante la mayor parte del siglo XX.

Reflectores mejor que refractores

A pesar de sus éxitos —y del hecho de que anduviese ya mediados los treinta— Foucault no tenía aún un puesto oficial. Puede que su personalidad influyera en ello. Uno de sus contemporáneos observó que "sus aires de mandarín con coleta no complacen a todo el mundo". De todos modos, en 1855 se le nombró físico oficial del Observatorio de París, dirigido tras la muerte de Arago por Urbain Le Verrier, célebre por la predicción que había llevado al descubrimiento del planeta Neptuno. Los instrumentos del observatorio debían ser puestos al día y Le Verrier pidió a Foucault que construyera un telescopio refractor con una lente gigante de 74 centímetros de diámetro. Pero Foucault llegó pronto a la conclusión de que un telescopio reflector dotado de un gran espejo sería preferible.



El péndulo de Foucault

El plano de oscilación, o plano de movimiento, del péndulo de Foucault está obligado, por su inercia, a seguir a las estrellas fijas. El plano de oscilación seguirá en concreto la componente del movimiento de las estrellas fijas según el horizonte (*indicada en azul claro*). A un observador situado sobre el suelo el fenómeno se le manifestará como una lenta rotación del plano de oscilación del péndulo, indicativo del movimiento de la Tierra bajo sus pies. También puede entenderse el viraje como producido por la fuerza de Coriolis (*indicada en azul oscuro*) que actúa en un sistema de referencia en rotación, como es la Tierra. La esfera del péndulo y el cable giran con la Tierra; sólo el inmaterial plano de oscilación vira con las estrellas.

—W.T.

En su experimento del Panteón de 1851, Foucault usó arena apilada para demostrar el viraje del plano de oscilación de su péndulo, formado por una esfera de 28 kg sujeta a un cable de 67 m.

El plano virará lentamente en sentido dextrógiro en el hemisferio norte, poniendo de manifiesto la rotación en sentido contrario de la Tierra (*movimiento muy exagerado en el dibujo*).

La construcción y el lanzamiento del péndulo tienen que hacerse con suma precisión, pues de lo contrario la trayectoria podría describir bucles (*movimiento muy exagerado en el dibujo*), enmascarando el efecto de la rotación de la Tierra.

Lord Rosse construía por entonces este tipo de telescopios en Irlanda, aunque sus instrumentos usaban espejos metálicos que eran pesados y difíciles de amoldar y mantener, porque su superficie se deslustraba. Newton sabía ya que el vidrio era un material más prometedor para la construcción de espejos, a condición de que fuera lo bastante reflectante. Afortunadamente Foucault no ignoraba que las amalgamas tóxicas de mercurio aplicadas al dorso de los espejos estaban siendo sustituidas por una capa de plata depositada por la reducción química de soluciones de nitrato de plata, que él mismo había usado en el espejo rotatorio de su primer experimento de medición de la velocidad de la luz. La capa de plata era muy fina y podía aplicarse en la parte frontal de los espejos de telescopio sin que se viera afectada su capacidad de enfoque. Esto tenía la ventaja adicional de que, cuando la plata se delustraba, podía ser reemplazada fácilmente sin dañar la calidad óptica de la superficie de vidrio subyacente. El telescopio reflector de vidrio metalizado se había vuelto técnicamente posible.

Foucault construyó telescopios reflectores de 10 y de 22 centímetros de diámetro que funcionaron satisfactoriamente, pero los métodos de tanteo usados entonces para pulir superficies ópticas no eran adecuados para diámetros superiores. Tras cinco intentos infructuosos de fabricar un espejo de 42 centímetros, ideó tres métodos distintos de comprobación de las superficies ópticas. El más eficaz es la prueba del filo de cuchillo: una hoja afilada eclipsa parcialmente la imagen reflejada de una fuente puntual, magnificando cualquier defecto de pulido y permitiendo la identificación y la eliminación de las imperfecciones.

El mayor telescopio construido por Foucault tenía un diámetro de 80 centímetros y estaba instalado en el Observatorio de Marsella, bajo el claro cielo mediterráneo. Se había abierto el camino que conduciría a los telescopios reflectores gigantes del futuro.



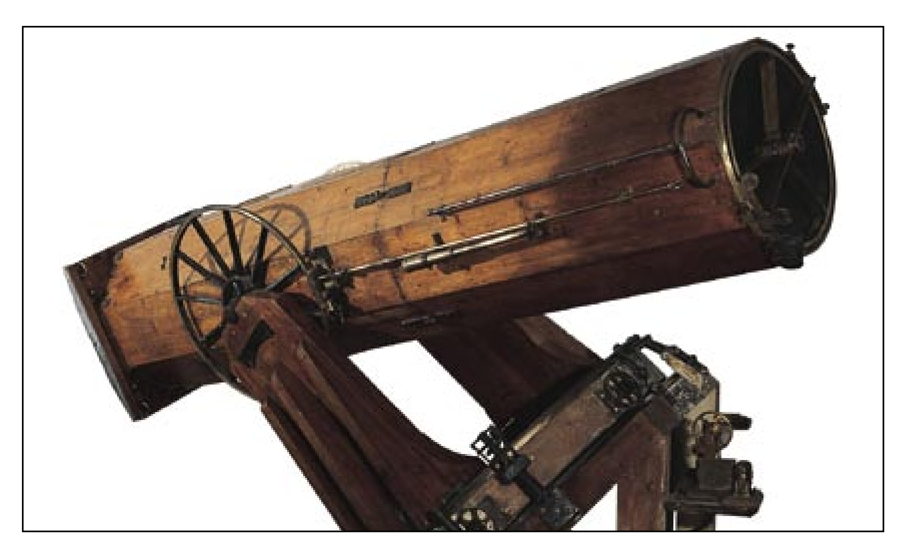
La medida de la distancia solar

El descubrimiento de Neptuno no significó para Le Verrier más que el preludio a la obra de su vida: el análisis newtoniano de los movimientos del sistema solar. Mediante cálculos heroicos, Le Verrier refinó las estimaciones de las masas planetarias y dedujo que la distancia al Sol era aproximadamente un tres por ciento menor de lo que se creía. El valor físico de la velocidad de la luz se había calculado hasta entonces exclusivamente a partir de medidas astronómicas, una de las cuales era la distancia solar. En consecuencia Le Verrier estimó que la velocidad real de la luz en el vacío sería también un tres por ciento menor que la mejor estimación disponible, que eran 308.000 kilómetros por segundo.

Para contrastar esta predicción se dirigió de nuevo a Foucault, pidiéndole que convirtiera su experimento diferencial de 1850 en un experimento absoluto para la medida de la velocidad de la luz, cosa que Foucault hizo alargando la trayectoria a 20 metros merced a una serie de cinco espejos cóncavos de frente plateado. Una rueda dentada rotatoria accionada mecánicamente permitió fijar estroboscópicamente la velocidad de rotación del espejo en 400 revoluciones por segundo. El resultado de Foucault, anunciado a la Academia de Ciencias en septiembre de 1862, fue de 298.000 kilómetros por segundo, lo que coincidía con la predicción de Le Verrier y no difiere en más del uno por ciento del valor actualmente aceptado.

Los libros de texto de física se refieren a veces a la medición de Foucault, sobre todo porque su método fue adoptado por Albert A. Michelson en los Estados Unidos. Pero suele tergiversarse su intención al realizar el experimento. No se sabía entonces que la velocidad de la luz fuese una constante física de importancia capital (la teoría electromagnética de la luz de James Clerk Maxwell no se publicó hasta 1865 y Einstein no había nacido todavía). La única cuestión relevante en 1862 era la distancia al Sol, considerada por Le Verrier "la cuestión más decisiva de la astronomía moderna".

El experimento de la velocidad de la luz fue el último gran proyecto de Foucault, que dedicó el resto de su vida a trabajar para distintos comités y a uno de sus intereses iniciales,



4. TELESCOPIO con un espejo de 20 centímetros de diámetro (*izquierda*) construido por Foucault siguiendo un procedimiento especial consistente en aplicar una fina capa de plata sobre un espejo de cristal. Desarrolló técnicas para la fabricación de espejos mucho mayores, abriendo el camino a los telescopios reflectores gigantes del futuro. El mayor telescopio hecho por él contaba con un espejo de cristal plateado de 80 centímetros (*arriba*) y se acabó de construir en París en 1862. Pronto fue transferido al Observatorio de Marsella, de cielos más despejados, donde se le utilizaría durante un siglo. No hace mucho que se le ha declarado monumento histórico de Francia.

los reguladores mecánicos. Buscaba inventar un regulador universal que le hiciese rico, pero el éxito no le acompañó: las necesidades industriales eran demasiado diversas y sus diseños carecían de estabilidad dinámica.

La vida de un gato

¿Cómo dar una idea resumida del Foucault científico? Donné dijo de él que "no todo el mundo le consideraba un verdadero físico, porque no había estudiado todas las ramas de la física y probablemente no habría podido dar un curso completo de física elemental... Para muchos era un aficionado. De hecho, el mismo Foucault usó con orgullo esta palabra: 'Somos aficionados en el verdadero sentido de la palabra..., nos dedicamos a aquellos aspectos de la ciencia hacia los que nos conduce nuestro instinto'".

El fuerte de nuestro hombre era, en suma, la *precisión experimental*. Ni siquiera actualmente resulta sencillo construir un péndulo de este tipo, pues el período de viraje no es más que 1/20.000 del de oscilación. Más de un supuesto péndulo de Foucault anda por ahí cuyo desplazamiento se debe más a la falta de cuidado con que está construido que a la rotación de la Tierra, lo que le obliga a describir trayectorias en forma de bucle.

La Sociedad Real de Londres fue una de las muchas organizaciones académicas que reconocieron los méritos de Foucault al conferirle en 1855 su honor más prestigioso, la medalla Copley. Sin embargo, no le fue fácil obtener el reconocimiento de sus propios colegas. La tradición científica francesa era analítica y formal y, a pesar de que la intuición y la perspicacia mecánicas de Foucault fuesen formidables, sus dotes matemáticas eran limitadas. Su tesis doctoral sobre los experimentos de 1850 contenía errores de álgebra que fue incapaz de corregir durante el examen oral.

Tampoco podía Foucault alcanzar grandes niveles de abstracción. En 1849 estudió el arco eléctrico, observando que podía emitir y absorber los rayos amarillos de Fraunhofer y proponiendo incluso que el estudio de los espectros estelares sería beneficioso para la astronomía. Pero fue el físico alemán Gustav Kirchhoff, y no Foucault, quien formuló diez años después reglas empíricas claras que describiesen la absorción y la emisión de radiación.

Hay que tener en cuenta además que Foucault no se había formado en las escuelas aceptadas por la elite científica, la Escuela Politécnica y la Escuela Normal Superior. Tal vez por ello, y por la animosidad despertada por sus artículos periodísticos, Foucault no fue elegido miembro de la Academia de Ciencias hasta 1865, al sexto intento, cuando hacía ya tiempo que era famoso.

Dos años después, en julio de 1867, Foucault empezó a mostrar síntomas de parálisis. Murió siete meses después, a los cuarenta y ocho años, probablemente de esclerosis múltiple y no a causa del exceso de trabajo y las preocupaciones, como se creyó en su momento.

El obituario de Donné revela algunas de las múltiples facetas de Foucault: "Cuando le introduje en la intimidad de mi familia, resultó muchas veces desagradable y molesto, sobre todo porque nunca perdía los nervios y defendía sus opiniones en un tono frío y calmo. Esta calma le resultaba muy útil en determinadas circunstancias y le he visto —a él, que tenía un aspecto débil y frágil— ahuyentar a los oponentes más formidables... [Pero] nunca era reticente a explicar las más abstractas leyes físicas a los profanos y, sobre todo, a las profanas."

Pese a esta observación, Foucault nunca se casó. Donné escribió de él que "llevaba, por así decirlo, la vida de uno de esos gatos de casa acomodada que se instalan en el mejor lugar del dormitorio o de la sala... Cuando le visitaba alguien que no le interesaba, se retiraba a un rincón con su cuaderno y su eterno lápiz". Pero, continúa Donné, "aunque no fuese de trato fácil, su fidelidad para con los amigos estaba fuera de toda duda". Y, en efecto, un numeroso grupo de amigos asistió a su funeral.

El nombre de Foucault sería luego inscrito en la Torre Eiffel. Sin ser un genio de la categoría de Newton o de Einstein, este hijo notable de la Ciudad de la Luz ha pasado justamente a la posteridad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FRENCH DAGUERREOTYPES. Janet E. Buerger. University of Chicago Press, 1989.

TOOTHED WHEELS AND ROTATING MIRRORS: PARISIAN ASTRONOMY AND MID-NINETEENTH CENTURY EXPERIMENTAL MEASUREMENTS OF THE SPEED OF LIGHT. William Tobin en *Vistas in Astronomy*, vol. 36, núm. 3, páginas 253-294; 1993.

FOUCAULT, HIS PENDULUM AND THE ROTATION OF THE EARTH. W. Tobin y B. Pippard en *Interdisciplinary Science Reviews*, vol. 19, núm. 4, páginas 326-337; 1994.

Protoestrellas

El nacimiento de una estrella va siempre acompañado de fenómenos violentos de contracción gravitatoria y de eyección de materia. Gracias a los radiotelescopios y telescopios de ondas infrarrojas podemos aproximarnos a las fases iniciales de la formación estelar

Rafael Bachiller

Las estrellas son ladrillos básicos en el edificio del universo. Basta con mirar al cielo en una noche despejada para percatarnos de ello. Veremos estrellas en un número incontable: hay del orden de 100.000 millones sólo en nuestra galaxia. Y siguen naciendo nuevas, mientras otras mueren. Para alcanzar un mínimo conocimiento del cosmos, hemos de comprender el origen, la estructura y la evolución de las estrellas.

En la débil luz que nos llega de las estrellas se encuentran pistas valiosísimas que han permitido reconstruir el curso de su vida, su estructura física y composición química. En esencia, una estrella es una bola de gas en la que la fusión del hidrógeno, en su interior, y la gravedad constituyen los fenómenos dominantes. Tras desentrañar su estructura, pudo predecirse con bastante precisión de qué manera evolucionan las estrellas. De hecho, la teoría de la evolución estelar merece contarse entre los mayores logros de la ciencia del siglo XX. Pero aún queda algún cabo suelto; el más suelto, el nacimiento de las estrellas.

Hasta hace poco no se conocían bien los mecanismos de la formación estelar. Pero se han dado ya grandes pasos. Se han identificado muchos de los fenómenos fundamentales que dominan esa gestación. Observaciones y modelos vienen aportando día a día nuevos detalles de los procesos involucrados. Dichos avances se deben al progreso de los telescopios y de los detectores astronómicos.

Se sabía que las estrellas nacen en nubes interestelares moleculares. Dichas nubes, llamadas moleculares por estar compuestas de moléculas de hidrógeno mezcladas con pequeñas partículas sólidas ("polvo"), se encuentran distribuidas por toda la galaxia, si bien abundan en los brazos espirales. La formación de estrellas sucede a partir de la contracción de una región densa de nubes, de un núcleo denso.

El proceso de formación acontece, pues, en regiones que se nos hurtan a la visión; el polvo del núcleo denso y de la nube ambiente levanta una pantalla opaca a las observaciones en el rango óptico del espectro. Esta es la razón principal por la que las protoestrellas (objetos de los que acabará emergiendo una estrella, de manera similar a como una mariposa emerge de su crisálida) se habían vedado a la observación durante mucho tiempo.

Pero la barrera se ha franqueado con el desarrollo de la astronomía de infrarrojos y de ondas de radio, capacitadas para acceder a las zonas más escondidas de las nubes moleculares. En particular, los núcleos densos que se contraen ("colapsan") para formar estrellas son observables mediante las emisiones electromagnéticas del gas molecular a longitudes de onda milimétricas; las nubes dejan pasar esas radiaciones.

Durante los últimos 10 años se han construido grandes telescopios e interferómetros que operan a longitudes de onda milimétricas, emplazados en Japón, Estados Unidos y Europa. En nuestro continente tenemos el telescopio de 30 m de diámetro de Pico Veleta (cerca de Granada) y el interferómetro de 5 antenas de 15 metros de Plateau de Bure (en los Alpes franceses), ambos del Instituto germano-francés-español de Radioastronomía Milimétrica (IRAM). Las observaciones a través de ellos, interpretadas con modelos numéricos en ordenadores de potencia creciente, han aportado una información sumamente valiosa sobre las regiones de formación estelar.

Las estrellas dotadas de gran masa evolucionan mucho más deprisa que las de masa escasa. En términos comparativos, la fusión del hidrógeno es mucho más eficaz en las primeras. Para hacerse una idea, baste decir que una estrella madura de la secuencia principal cuya masa multiplique por cincuenta la solar luce un millón de veces más que el Sol. (Se denomina secuencia principal a la zona del diagrama de Hertzsprung-Russell en la que se agrupan las estrellas maduras.) Eso explica que las estrellas dotadas de gran masa agoten antes su combustible y vivan menos que las poco masivas.

Las estrellas dotadas de gran masa pueden desarrollar un núcleo portador de energía suficiente y en él empezar a quemar su hidrógeno en épocas muy tempranas. Si el Sol necesitó 30 millones de años para comenzar la fusión, una estrella 50 veces más masiva precisaría sólo de diez mil años. Por otro lado, la escala de tiempo característica de la contracción gravitatoria para un esfera gaseosa con la densidad típica

RAFAEL BACHILLER es astrónomo del Observatorio Astronómico Nacional en Alcalá de Henares. También viene desarrollando su actividad investigadora en la Universidad Joseph Fourier de Grenoble y en el IRAM. Además de la formación estelar, su interés se centra en la físico-química del medio interestelar y de las nebulosas planetarias. Es miembro de diversos comités científicos internacionales y presidente del "Grupo Internacional de Trabajo sobre Formación de Estrellas" de la Unión Astronómica Internacional.

de los núcleos densos interestelares (unas 10.000 partículas por centímetro cúbico) es del orden de medio millón de años. Ello significa que las estrellas dotadas de gran masa inician la fusión del hidrógeno en su interior mucho antes de haber terminado la fase de contracción gravitatoria. Además, las estrellas dotadas de gran masa, incluidas las muy jóvenes, producen vientos violentísimos que agitan y alteran el medio circundante. Por último, estas estrellas parecen preferir formarse en extensas asociaciones o grupos, lo que origina una enorme complejidad en esas regiones de gestación estelar. Dicho en breve, lo mismo la estructura de las protoestrellas masivas que las características del medio donde se encuentran inmersas resultan sumamente intrincadas.

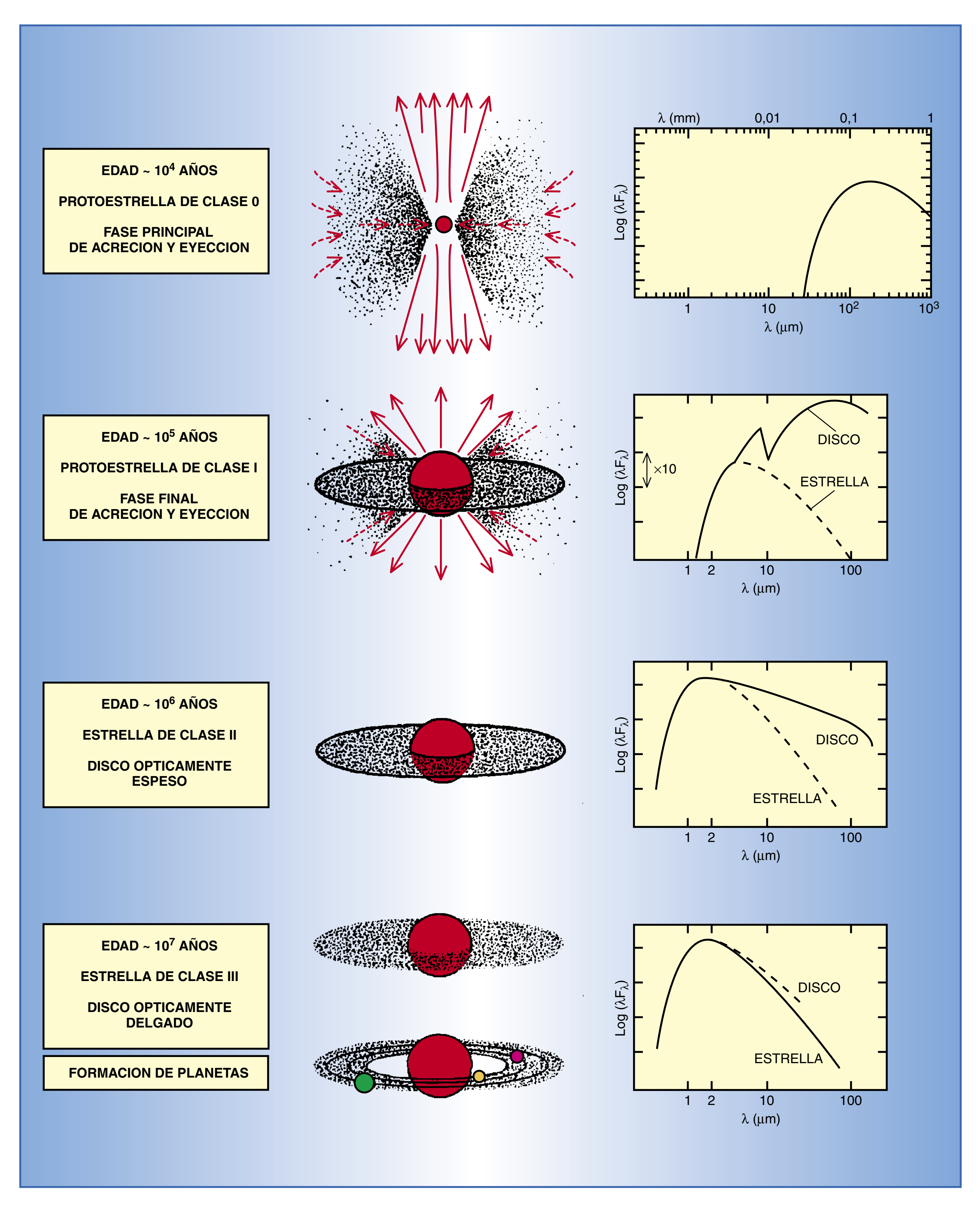
Muy distinto, más apacible, es el nacimiento de las estrellas de tipo solar. De evolución lenta, no empiezan la fusión del hidrógeno hasta que termina la fase de contracción gravitatoria. Ello no obsta para que quizás hayan comenzado a quemar deuterio, una variedad isotópica pesada del hidrógeno cuya abundancia —en número de átomos— es 5000 veces menor. Las de tipo solar se engendran también sin el concurso de muchísimas más, que define a las estrellas dotadas de gran masa; asimismo, su impacto sobre la nube interestelar en que se originan está mucho más amortiguado. Por todas estas razones, las protoestrellas de baja masa constituyen el modelo ideal para el estudio de las primeras fases de la formación estelar.

La mayor dificultad con que se encuentran los astrónomos para la observación de las protoestrellas estriba en su ubicación; se hallan alojadas, embebidas en nubes densas que sólo dejan pasar la radiación emitida a longitudes de onda infrarrojas y radio. Las ondas más cortas son absorbidas por las partículas de polvo de la nube.

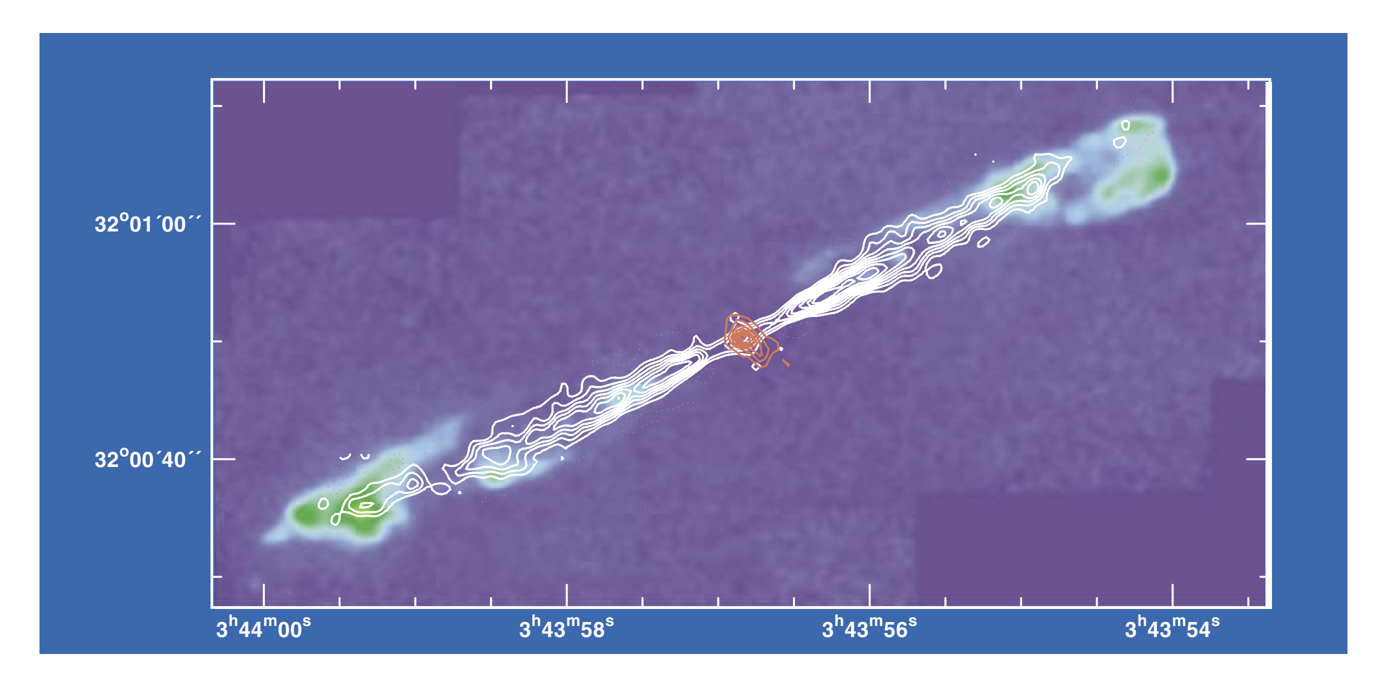
Las protoestrellas incorporan, acretan, el material del entorno. Producen así una cavidad en la nube. Además, esos objetos son fuentes de potentes vientos, capaces de dispersar cantidades de material del entorno progresivamente mayores. Gracias a lo



1. REGION DE FORMACION DE ESTRELLAS en la Nebulosa del Aguila (Messier 16) dentro de la constelación de Serpens, a unos 7000 años luz de distancia. Esta imagen, tomada por J. Hester y P. Scowen, de la Universidad de Arizona, con el telescopio espacial Hubble, muestra la parte superior de una nube interestelar en forma de columna. La nube, constituida esencialmente por hidrógeno molecular mezclado con partículas de polvo interestelar, sufre un proceso de erosión lenta por la luz ultravioleta que proviene de estrellas brillantes próximas. En virtud de ese proceso de fotoevaporación, salen a la luz pequeños glóbulos gaseosos especialmente densos que se encontraban embebidos en la nube. Las sombras de los glóbulos protegen el material situado tras ellos y se generan estructuras digitiformes. En algunos de esos "dedos" se detectan estrellas recién nacidas.



2. SECUENCIA DE FORMACION de una estrella de tipo solar con un sistema planetario. Cuando se contrae un núcleo denso de una nube interestelar, los movimientos de colapso gravitatorio, acoplados al campo magnético, originan, al cabo de unos 10.000 años, una protoestrella de clase 0. En ésta, los movimientos de eyección de materia adquieren igual importancia que los de contracción. La protoestrella nacida emite a longitudes de onda submilimétricas. En la etapa posterior, convertida en protoestrella de clase I, el joven objeto celeste ha atrapado casi toda su masa, pero su emisión queda enmascarada por la intensa radiación infraroja del disco circunestelar. En etapas posteriores la emisión está dominada por la estrella, pues el material circunestelar va dispersándose y sólo permanece un disco en rotación en torno a la estrella central. Dicho disco podrá acabar engendrando planetas al cabo de unos 10 millones de años.



3. PROTOESTRELLA DE CLASE 0, conocida por HH211-mm. Eyecta un chorro supersónico de materia. Los contornos en rojo representan la emisión en el continuo milimétrico que traza la envoltura protoestelar. Los contornos en blanco simbolizan la emisión de monóxido de silicio (SiO) que traza la potente eyección de materia en una dirección bien definida. Al final de este chorro, la interacción con el gas ambiente es muy violenta; se forman allí unas ondas de choque en arco. La región terminal se hace visible a través de la emisión de monóxido de carbono (CO); se representa mediante los colores azul claro y verde en los extremos del chorro. Estas observaciones han sido realizadas por F. Gueth y colaboradores con el interferómetro del IRAM en Plateau de Bure (Francia).

cual, conforme va evolucionando la protoestrella, puede atravesar la nube una radiación de longitud de onda cada vez más corta. Por tanto, la distribución espectral de la energía (DEE) emitida por una protoestrella o una estrella joven nos indica su estadio de evolución.

Los objetos más jóvenes tienen una DEE con el máximo entre el infrarrojo lejano y las ondas de radio, mientras que las estrellas casi maduras presentan una distribución espectral de la energía con su máximo hacia el infrarrojo cercano o el óptico. En razón de su DEE se distinguen, desde hace algunos años, tres tipos de objetos: de clase I, II y III.

Las protoestrellas de clase I presentan el máximo de su emisión a longitudes de onda entre 10 y 100 micrometros. En esa fase, guardan todavía una asociación estrecha con los núcleos densos de las nubes donde surgieron. Se las supone constituidas por un núcleo caliente de tipo cuasi-estelar —entre 3000 y 5000 grados kelvin—, rodeado por una envoltura bastante consistente y a una temperatura de unos 300-1000 kelvin. Vienen a tener unos 100.000 años de edad, y aún no han concluido la fase de acreción; es decir, no han incorporado toda la materia que formará finalmente la estrella, aunque falta poco. En otros términos, la masa de la envoltura es menor que la masa ya acretada en la protoestrella central.

Las estrellas de clase II manifiestan una distribución espectral de la energía con el máximo entre 2 y 10 micras. Se trata de estrellas plenamente constituidas (de las llamadas de tipo T Tauri), que en muchas ocasiones son visibles en el óptico. Mantienen un disco espeso de gas y polvo a su alrededor, aunque ya han acretado o dispersado la parte esencial de su envoltura. Se les atribuye una edad en torno al millón de años.

En los objetos de clase III, la DEE tiene su máximo por debajo de 2 micras. Al ser muy delgado, si es que existe, el disco circunestelar, percibimos el objeto con toda nitidez en el óptico. En esta categoría se incluyen las estrellas T Tauri de las llamadas "desnudas" y algunas estrellas que están a punto de entrar en la secuencia principal.

Además de estos tres tipos de estrellas jóvenes, los detectores de ondas de radio a longitudes de onda del orden del milímetro (ondas milimétricas) han revelado la existencia de objetos cuya DEE tiene el máximo a longitudes de onda entre 100 micras y 1 mm, más largas, por consiguiente, que el intervalo donde presentan su máximo las protoestrellas de clase I. Ello significa que las emiten objetos mucho más fríos, profundamente inmersos en núcleos muy densos de nubes interestelares. Estos objetos deben ser, por tanto, protoestrellas más jóvenes que las de clase I; se les denomina "protoestrellas de clase 0" (o protoestrellas submilimétricas).

Las protoestrellas de clase 0 tienen temperaturas típicas de 15 a 30 grados kelvin. Emiten la mayor parte de su radiación entre el infrarrojo lejano y las ondas milimétricas. Amén de presentar todos las propiedades atribuibles a las protoestrellas más jóvenes (incluidos los procesos de contracción gravitatoria), algunas protoestrellas ofrecen rasgos sorprendentes, en particular unas eyecciones de materia muy energéticas. ¿En qué consisten tales eyecciones?

A principios de los años ochenta el estudio sobre el nacimiento de las estrellas sufrió una pequeña revolución. Se descubrió que de las estrellas jóvenes brotaban unas potentes eyecciones de materia. Un fenómeno paradójico, si consideramos que lo que se andaba buscando, durante años, eran los movimientos de caída del gas, desde la nube envolvente hacia el objeto protoestelar. Pero lo que se detectó fueron masas enormes

de gas que salían despedidos de la protoestrella a enorme velocidad.

Debemos el descubrimiento a las observaciones realizadas, entre otros astrónomos, por John Bally, Charles Lada y Ronald Snell en las líneas espectrales de rotación de la molécula del monóxido de carbono (CO), en ondas milimétricas. Se les llama "flujos moleculares" porque constan sobre todo de gas molecular neutro. Pronto se descubrió que dichos flujos moleculares eran bipolares: el flujo lo integraban dos haces que siguen la misma dirección aunque sentidos contrarios.

Gracias a las observaciones de las líneas de CO podemos medir la velocidad, masa y energía del gas eyectado. Se sabe ya que los flujos bipolares pueden alcanzar un tamaño de varios años-luz, que sus velocidades pueden ser de uno a unos centenares de kilómetros por segundo, que sus masas pueden ser de décimas a unos dos centenares de masas solares y que la energía cinética transportada por los flujos puede estar entre 10^{43} y 10^{48} erg.

Estos flujos portan tanta masa, que no pueden estar constituidos por materia estelar eyectada; antes bien, el material corresponde a la nube envolvente, que es arrastrado por un agente subyacente. Dado que la radiación que proviene de las estrellas jóvenes es insuficiente para acelerar la materia a las velocidades observadas, el flujo bipolar debe arrastrarlo una suerte de "viento primario" que se origine en las proximidades inmediatas del cuerpo estelar.

4. LA PROTOESTRELLA L1157-mm emite un flujo bipolar de materia que se extiende, en ambos sentidos, hasta una distancia de un año luz. El flujo se hace patente a través de la emisión en ondas milimétricas de las moléculas de monóxido de carbono. Este mapa fue realizado por el autor junto con Miguel Pérez utilizando el radiotelescopio del IRAM en Pico Veleta (cerca de Granada).

Reinardt Mundt y Bo Reipurth, entre otros, habían descubierto en los años ochenta unos chorros de material ionizado bipolares, muy brillantes en el óptico, que manaban también de las estrellas jóvenes. Aunque más veloces que los flujos moleculares, los chorros en cuestión portan menos masa, hasta el punto de que su cantidad de movimiento parecería insuficiente para empujar las masas involucradas en los flujos moleculares. Se admite, sin embargo, que esos chorros ópticos podrían contener una componente de gas atómico neutro con masa relativamente alta, aunque dicha componente sería difícil de observar. El gas ionizado que brilla en el óptico podría representar sólo el 10 por ciento de la masa total del chorro.

Se llegó muy pronto a la conclusión de que los flujos bipolares constituían un ingrediente esencial de la formación estelar. En particular parecen producir, mediante el barrido sistemático del material del entorno de la protoestrella, la secuencia evolutiva desde las protoestrellas de clase 0 hasta las de clase III, pasando por las de clase I y II.

En los flujos bipolares podría encerrarse la razón de la suspensión del desplome de la nube envolvente: la eyección de materia podría contrarrestar los movimientos de caída de gas y limitar así la masa final de la estrella en gestación. La agitación del gas producida por los flujos bipolares, al mantener las nubes moleculares en equilibrio, regularía el proceso de formación estelar. Con lo que se explicaría que no se hayan desplomado ya todas las nubes para formar estrellas, sino que la eficiencia del gas nebular en el proceso de gestación estelar se cifre en un cinco por ciento, que es lo que indican las observaciones. Los flujos bipolares podrían, por último, resolver el problema del momento angular. Pero antes debemos volver sobre las protoestrellas más jóvenes y describir las propiedades de los flujos que eyectan.

En 1990, mediante observaciones de alta sensibilidad en ondas milimétricas, un equipo liderado por el autor investigaba las propiedades en ondas de radio de los objetos protoestelares más jóvenes conocidos. No se había acuñado todavía la expresión "clase 0" —hasta 1993 no lo haría el grupo de Philippe André—, y nos referíamos a este tipo de fuentes como "objetos extremos de clase I". Mientras estudiábamos la protoestrella L1448/IRS3, descubrimos otro flujo bipolar muy espectacular en su entorno, cuyo origen parecía residir en otra protoestrella vecina desconocida. Tras una búsqueda exhaustiva en el rango de las ondas milimétricas hallamos su posición; la bautizamos con el nombre de protoestrella L1448-mm. Casi simultáneamente, la misma protoestrella fue detectada en ondas

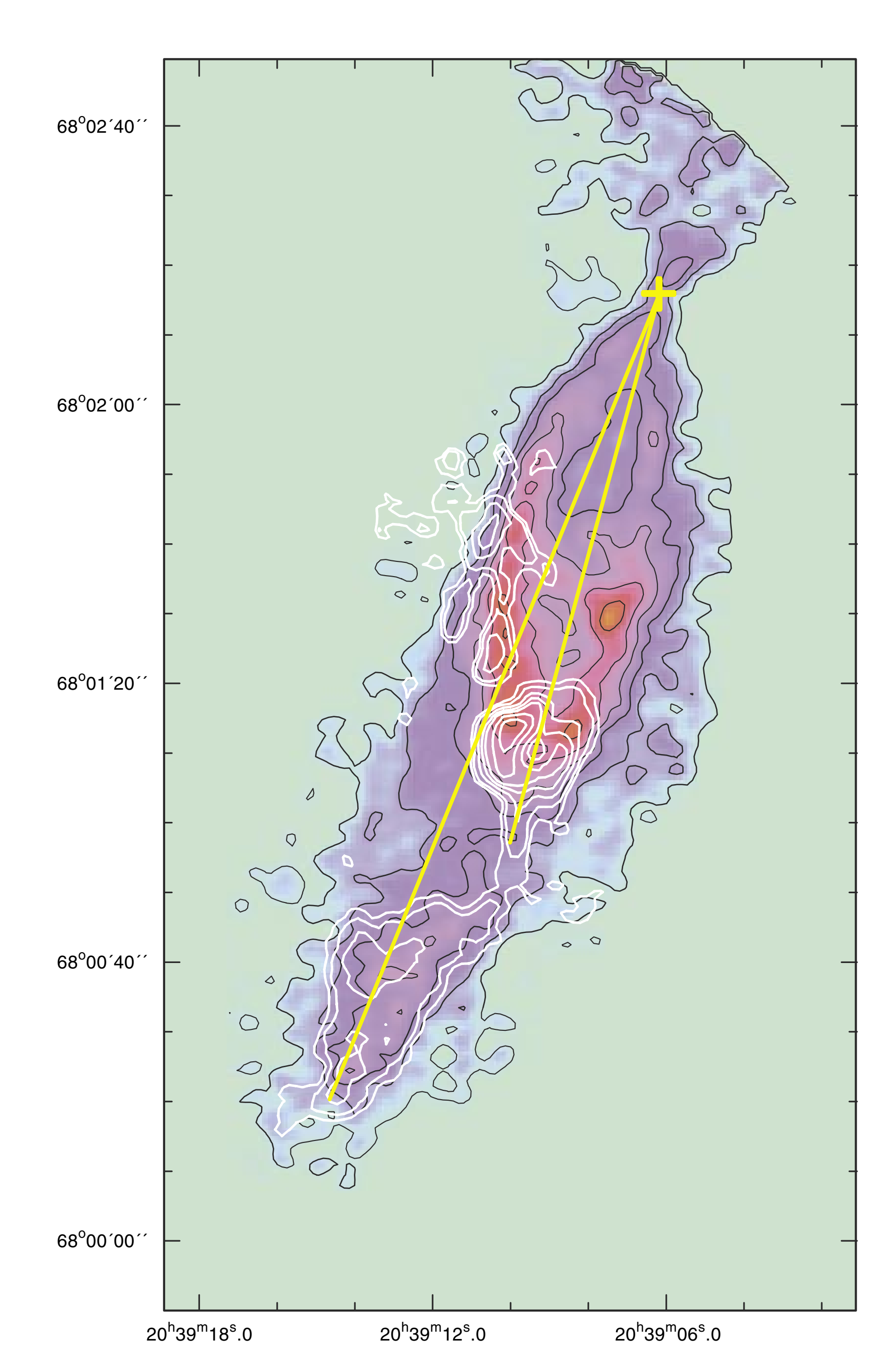
centimétricas por un equipo liderado por Salvador Curiel empleando el interferómetro VLA.

El flujo de L1448-mm era uno de los más rápidos conocidos. Presentaba una alta colimación (era muy estrecho), lo que le asemejaba a los chorros observados en el óptico. Pero, y eso resultaba más sorprendente, el gas más veloz estaba formado por una cadena de proyectiles cuya masa multiplicaba varias veces la de Júpiter. Por tanto, el viento que surgía de L1448-mm brotaba a pulsos, conclusión que contradecía la idea que se tenía hasta entonces de flujos bipolares, según la cual fluían de manera incesante y más o menos "apacible" a través de las nubes moleculares.

El estudio ulterior de otras protoestrellas de clase 0, hasta una treintena se han descubierto ya, muestra que muchas de ellas presentan flujos bipolares con propiedades extraordinarias, del tipo del observado en L1448-mm. La potencia mecánica de los flujos bipolares de las protoestrellas de clase 0 puede equipararse a la luminosidad bolométrica de las mismas, lo que habla de su enorme eficacia en la eyección de materia.

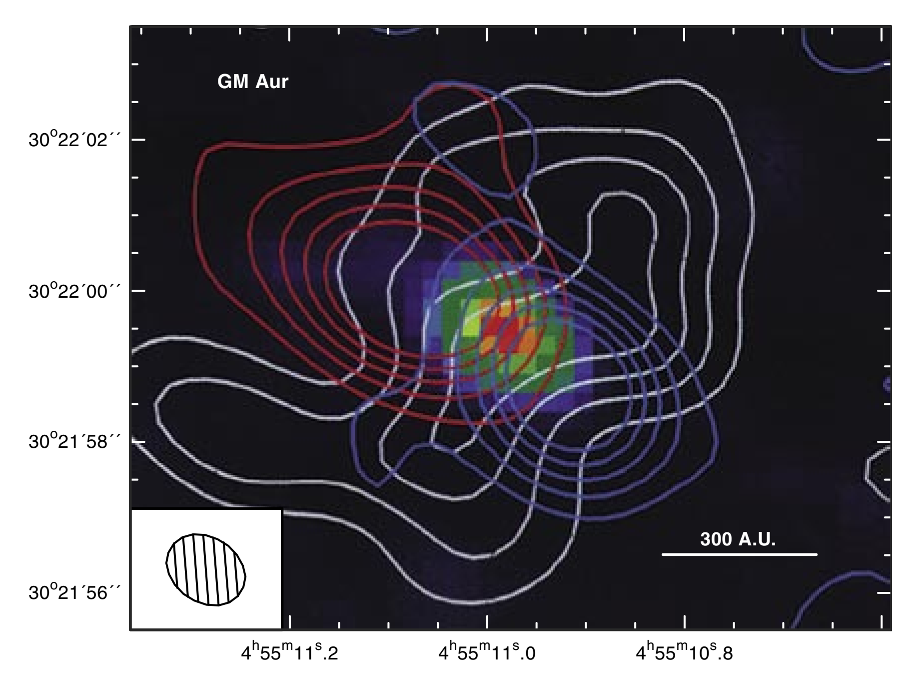
Resulta significativa desde un punto de vista estadístico la caída drástica de la potencia del flujo bipolar cuando una protoestrella pasa de la clase 0 a la clase I. Ahondando en esa tendencia, los flujos observados en objetos de clases I y II son mucho menos energéticos; en estrellas de clase III, inapreciables. Las observaciones demuestran, por tanto, que los flujos bipolares revisten particular interés en fases precoces de la formación estelar.

De manera más o menos simultánea con la observación de los flujos bipolares, se han venido investigando los movimientos implicados en la contracción gravitatoria que afectan a las protoestrellas. En virtud del efecto Doppler, dichos movimientos deben dejar una huella inequívoca en los espectros de ciertas líneas moleculares (un agujero en el lado de las bajas frecuencias). Durante los últimos años, varios grupos han detectado tales movimientos en diversas protoestrellas. En uno de estos grupos ha participado el autor, junto a Mario Tafalla, también del Observatorio Astronómico Nacional, Phil Myers, Diego Mardones y otros astrónomos de la Universidad de Harvard. De nuestras observaciones se desprende que los movimientos de colapso aparecen inequívocamente en las protoestrellas de clase 0, mientras que importan mucho menos en las protoestrellas de clase I.



5. HAZ SUR DEL FLUJO BIPOLAR eyectado por la protoestrella L1157-mm, en imágenes de alta resolución obtenidas por el autor, junto con F. Gueth y S. Guilloteau, utilizando el interferómetro del IRAM. La protoestrella está representada aquí por la cruz amarilla; las líneas de ese color indican las direcciones principales de eyección. Los contornos blancos, que representan la emisión del monóxido de silicio, marcan las zonas de alta temperatura donde se encuentra la onda de choque generada por la propagación del flujo supersónico. Las eyecciones dejan una estela de materia que brilla en las líneas del monóxido de carbono, región señalada con colores del azul al naranja.

Tenemos, pues, que las protoestrellas de clase 0 se encuentran en la fase más intensa de acreción o de colapso y que, paradójicamente, dicho desplome se acompaña por un violento flujo de materia hacia el exterior. Con otras palabras, las observaciones demuestran que hay gas que se inyecta en las protoestrellas de clase 0 siguiendo la contracción gravitatoria y que, simultáneamente, hay gas que se eyecta en un viento



6. GM Aur es una estrella joven de tipo T Tauri y situada a unos 400 años luz de la Tierra. Con una masa similar a la solar, su edad se estima en varios millones de años. La emisión del monóxido de carbono, cartografiada por A. Dutrey y colaboradores con el interferómetro del IRAM, revela la presencia de un disco de materia que gira en torno a la estrella. En la figura, los contornos azules simbolizan el gas del disco que se acerca hacia nosotros como consecuencia de la rotación, mientras los contornos rojos son del gas que se aleja. Los contornos blancos muestran el gas a velocidad nula. La imagen en color es la emisión en ondas milimétricas de los granos de polvo de la parte interna de la envoltura circunestelar.

bipolar. ¿Cómo dar con un modelo teórico que justificara esa inyección y eyección de materia?

Richard Larson había avanzado ya en 1969 un modelo de protoestrella, apoyado en la simulación numérica del desplome gravitatorio de una nube interestelar. Desde entonces, varios grupos se han esforzado por simular el colapso en condiciones cada vez más realistas, utilizando ordenadores de potencia creciente y programas de cálculo cada más refinados. El grupo de Frank Shu, de la Universidad de Berkeley, partió de modelos simples, similares al de Larson, y ha ido introduciendo cada vez más efectos físicos de acuerdo con los datos que ha venido aportando la astronomía observacional. ¿En qué situación nos encontramos? ¿Qué se sabe hoy sobre la formación de las protoestrellas?

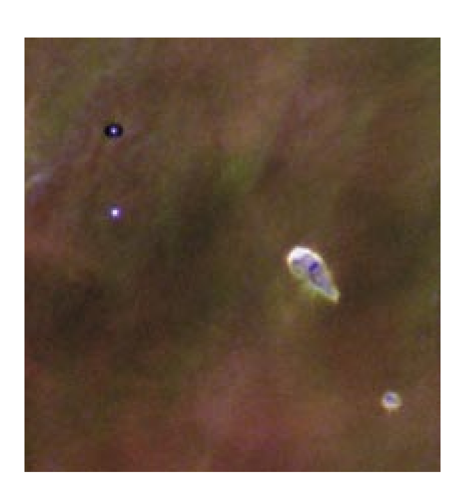
Los núcleos densos de las nubes moleculares contrarrestan la fuerza de atracción de su gravedad mediante fuerzas de presión del gas. Estas últimas pueden tener una componente térmica, otra vinculada a la turbulencia y una tercera debida al campo magnético interestelar. Llegado cierto momento (quizá por la acción de algún agente externo), el equilibrio puede romperse y la materia desplomarse sobre una región. En ese proceso, se libera energía gravitatoria en forma de radiación y se crea una condensación isoterma.

De manera paulatina, la zona de colapso va expandiéndose desde el centro de la nube hacia la periferia, mientras que en la zona más profunda la densidad aumenta hasta conformar un objeto muy opaco, el germen de la protoestrella. Los cálculos demuestran que el colapso no se produce de una forma homóloga, sino que la región interna se contrae mucho más deprisa que la externa.

Desde ese momento, el objeto entra en fase de acreción. La protoestrella se moldea con el material que va cayendo de la envoltura gaseosa. Steven Stahler, de la Universidad de Berkeley, y Francesco Palla, del Observatorio de Florencia, que estudiaron esa fase, llegaron a la conclusión de que el material debe caer a velocidades supersónicas y formar, por tanto, una onda de choque de acreción.

En la región del frente de choque son muy altas las densidades y las temperaturas. Allí la temperatura puede alcanzar el millón de grados kelvin, aunque por procesos radiativos decaiga prestamente hasta valores del orden de 10.000 grados. Esa zona tan caliente es la fuente de radiación que más contribuye a la luminosidad de la protoestrella y, por ende, la que nos permite explorarla. A diferencia de lo que ocurre en las estrellas maduras, la luminosidad de una protoestrella no proviene de la fusión nuclear, sino de la energía cinética del gas que se contrae.

La luz emitida en el frente de choque debe atravesar zonas muy densas de la protoestrella y de su envoltura antes de salir al exterior. Las partículas de polvo de tales regiones absorben los fotones, se quedan con parte de su energía y reemiten fotones menos energéticos, es decir, con longitudes de onda más largas. Este proceso puede repetirse varias veces para un fotón; el número concreto dependerá de la opacidad de la protoestrella. Lo que se obtiene



7. REGION DE LA NEBULOSA DE ORION, en imagen tomada por J. Bally, D. Devine y R. Sutherland con el telescopio espacial Hubble. La nebulosa de Orión dista de nosotros unos mil quinientos años luz. La imagen, que abarca sólo el tamaño de unos 0,14 años luz, muestra cuatro estrellas jóvenes, en algunas de las cuales se advierte con nitidez los discos de gas y polvo que las rodean. El objeto perliforme, denominado HST 10, aloja en su interior una estrella rodeada por un disco del tamaño del sistema solar. Un halo difuso de gas caliente, evaporado de la superficie del disco, ciñe al sistema estrella-disco. Estamos, pues, ante la fotoevaporación de un disco que, de haberse encontrado en otra región con menos radiación ultravioleta, podría haber formado planetas.

al final es una radiación intensa en el infrarrojo medio o lejano, o en ondas submilimétricas. Así se explica la distribución espectral de la energía que se observa en las protoestrellas. Mediante simulaciones numéricas, el equipo de Frank Adams ha reproducido muchas de las DEE observadas en objetos jóvenes.

Llega un momento en que la temperatura del centro de la protoestrella ha aumentado hasta el punto de desencadenar las reacciones de fusión nuclear. La fusión de átomos de hidrógeno necesita de una temperatura de 10 millones de grados, mientras que la del deuterio tan sólo precisa de un millón de grados. Las protoestrellas de masa moderada no alcanzan la temperatura requerida para la combustión del hidrógeno, pero pueden quemar deuterio y producir una radiación intensa. A medida que se va agotando el deuterio del interior, la combustión avanza hacia capas periféricas; en consecuencia, regiones cada vez mayores de la protoestrella ven aumentar su temperatura sin cesar. Intervienen también procesos de convección. Además, el calentamiento comporta una importante dilatación, razón por la cual las protoestrellas son objetos muy grandes: una protoestrella de masa solar puede ser varias veces mayor que el Sol.

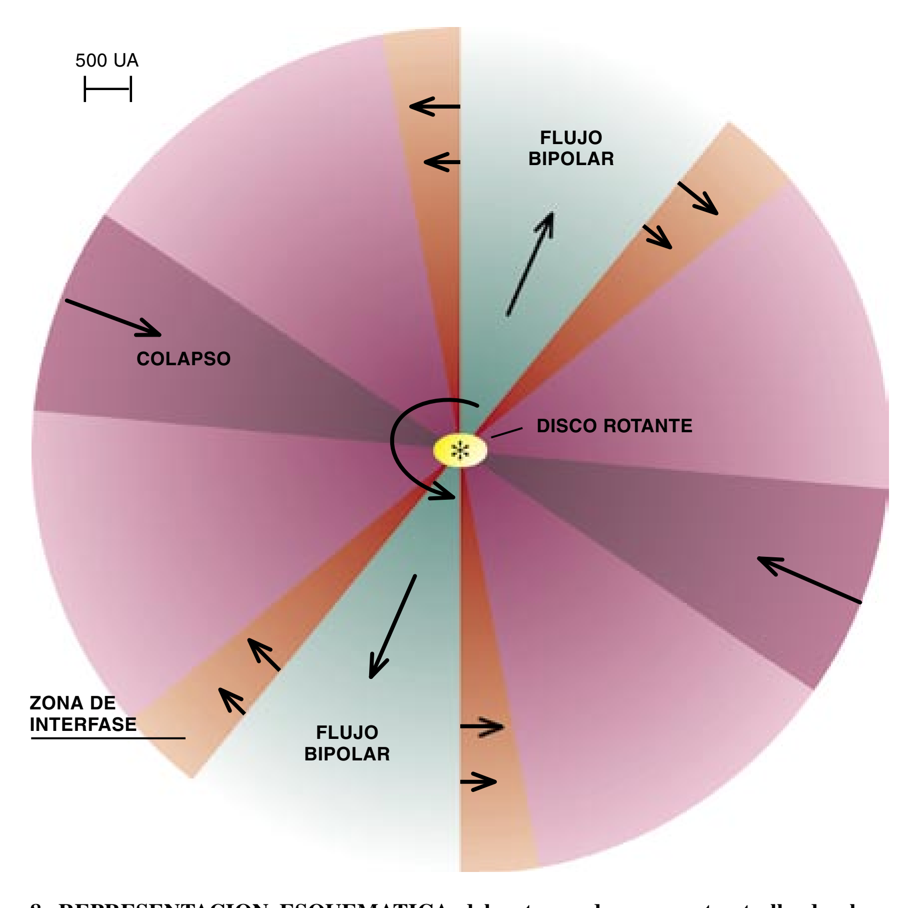
Aludimos antes al problema del momento angular. Ahora podemos explicarlo. Imaginemos que el núcleo denso, cuando empieza a contraerse para formar una estrella, posee un pequeño movimiento de rotación. No sólo es un proceso razonable, sino que se observa a menudo. Todos los elementos del fluido que caen hacia la zona central no se depositan exactamente sobre la misma posición, sino que, debido a la fuerza centrífuga, los elementos con mayor momento angular caen en posiciones del plano ecuatorial ligeramente desplazadas del centro. De esta manera, como mero resultado de la rotación inicial, se genera un disco de gas en torno a la estrella joven. Aparecen esos discos en muchos objetos (de notable interés en los de clase II); andando el tiempo, unos diez millones de años quizás, acabarán originando planetas.

Por otra parte, la conservación del momento angular exige que, a medida que se contraiga un núcleo rotante y reduzca su tamaño, aumente la velocidad de rotación. Es el mismo fenómeno que experimentan los patinadores cuando, girando sobre sí mismos, pegan a su cuerpo los brazos que tenían extendidos en cruz. El problema del momento angular consiste en que las velocidades de rotación de las estrellas jóvenes son relativamente lentas (~15 km/s), mucho más lentas de lo que se deduce de los movimientos observados en las nubes interestelares.

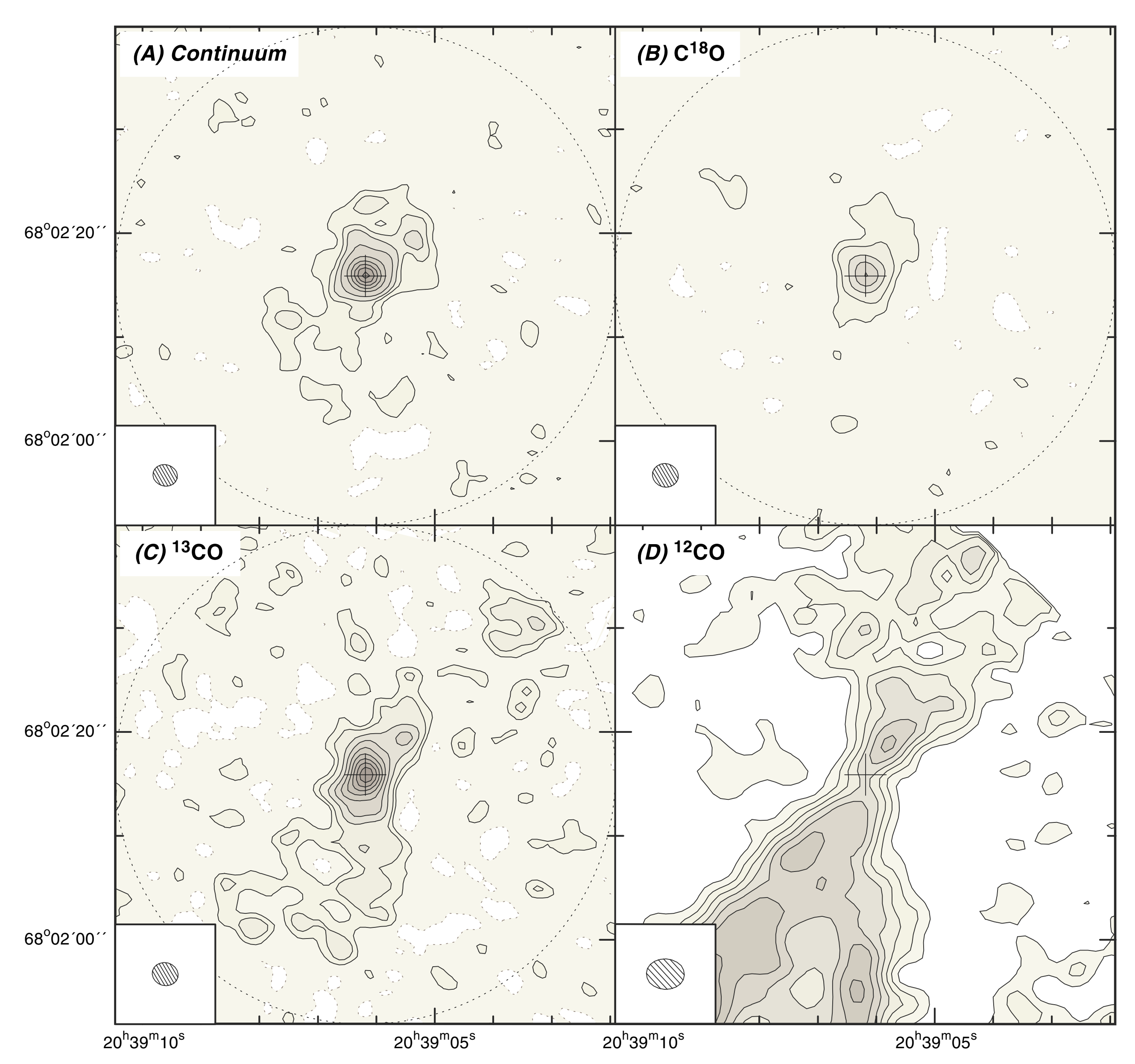
Se necesita, pues, un agente que transporte al exterior el momento angular conforme avance la contracción del núcleo. Hay cada vez más razones para pensar que el agente en cuestión pudiera ser el viento bipolar eyectado en las proximidades de la protoestrella. Cierta rotación impresa al viento emergente pudiera determinar que el objeto protoestelar quede girando lentamente y que el momento angular se conserve.

Los vientos protoestelares se observan de manera indirecta en objetos muy dispares. Y decimos de manera indirecta porque lo que realmente se perciben son los flujos bipolares; al hallarse éstos dotados de gran masa, no pueden estar constituidos por las eyecciones directas de materia del objeto joven, sino que deben estar formados por material robado a la nube envolvente. Sin embargo, la presencia de los flujos denuncia la acción de vientos primarios que pueden barrer tal material y que, posiblemente, están constituidos por materia atómica neutra, invisible en la mayor parte del espectro electromagnético. Porque se escapan a la observación directa no se conocen bien las propiedades fisicoquímicas de los vientos primarios, ni su lugar preciso de origen.

Se acepta, sin embargo, que el campo magnético desempeña una función principal en el mecanismo responsable de la eyección de los vientos protoestelares. Las fuerzas magnéticas que actúan sobre la materia interestelar débilmente ionizada (la llamada fuerza de Lorentz) resultan muy eficaces para lanzar el gas a grandes distancia sobre un eje bipolar.



8. REPRESENTACION ESQUEMATICA del entorno de una protoestrella de clase 0. En estos objetos los movimientos del gas eyectado son tan energéticos como los del gas que cae por contracción gravitatoria. El flujo bipolar de materia excava una oquedad en la nube interestelar donde se está gestando la estrella. Las paredes de la cavidad son de gas calentado y comprimido por el paso del flujo. La contracción gravitatoria acontece en torno al plano perpendicular al flujo bipolar. De inmediato se forma un disco rotante en la región circunestelar.



9. IMAGENES INTERFEROMETRICAS de la región cercana a la protoestrella L1157-mm. Revelan diferentes componentes de la materia en el entorno protoestelar. La imagen en el continuo milimétrico muestra la emisión de los granos de polvo (partículas sólidas) en la región interna de la nube. Esa zona se nos manifiesta a través de la emisión de moléculas del $C^{18}O$ (una variedad muy poco abundante del monóxido de carbono) contenidas en el gas. Las moléculas del isótopo principal ^{12}CO ofrecen el flujo bipolar. Las moléculas de ^{13}CO muestran una región intermedia entre la de mayor densidad y el flujo molecular.

Del examen anterior se desprende que el campo magnético ha de incluirse en todos los modelos de contracción, lo que a la postre no deja de ser conveniente. Forzados por el campo magnético, los iones se mueven sobre trayectorias espirales. Se crea una turbulencia magnética que opone resistencia a los movimientos de las partículas neutras cuando la nube intenta contraerse. El fenómeno provoca, además, una clase de segregación entre las partículas ionizadas y las neutras que se conoce por difusión ambipolar.

El grado de ionización decrece en las regiones más profundas y densas de las nubes. La materia puede desplomarse allí libremente, a lo largo de las líneas del campo magnético. Si coincide que hay un pequeño movimiento de rotación en torno al campo magnético, se generará un disco mediante una contracción no-homóloga. Es decir, la parte interna de la nube (donde la ionización es menor y la turbulencia magnética menos eficaz) se irá contrayendo mucho más aprisa que la parte externa.

Una vez formada la condensación protoestelar y su disco, las líneas del campo magnético atravesarán la superficie rotante de ambos (disco y protoestrella). Los modelos predicen que el campo magnético se comporta de manera rígida desde la región central hasta una distancia llamada radio de Alfven. En la región en torno al radio de Alfven la densidad de energía magnética viene a ser del mismo orden que la densidad de energía cinética del gas que se precipita a lo largo de las líneas magnéticas.

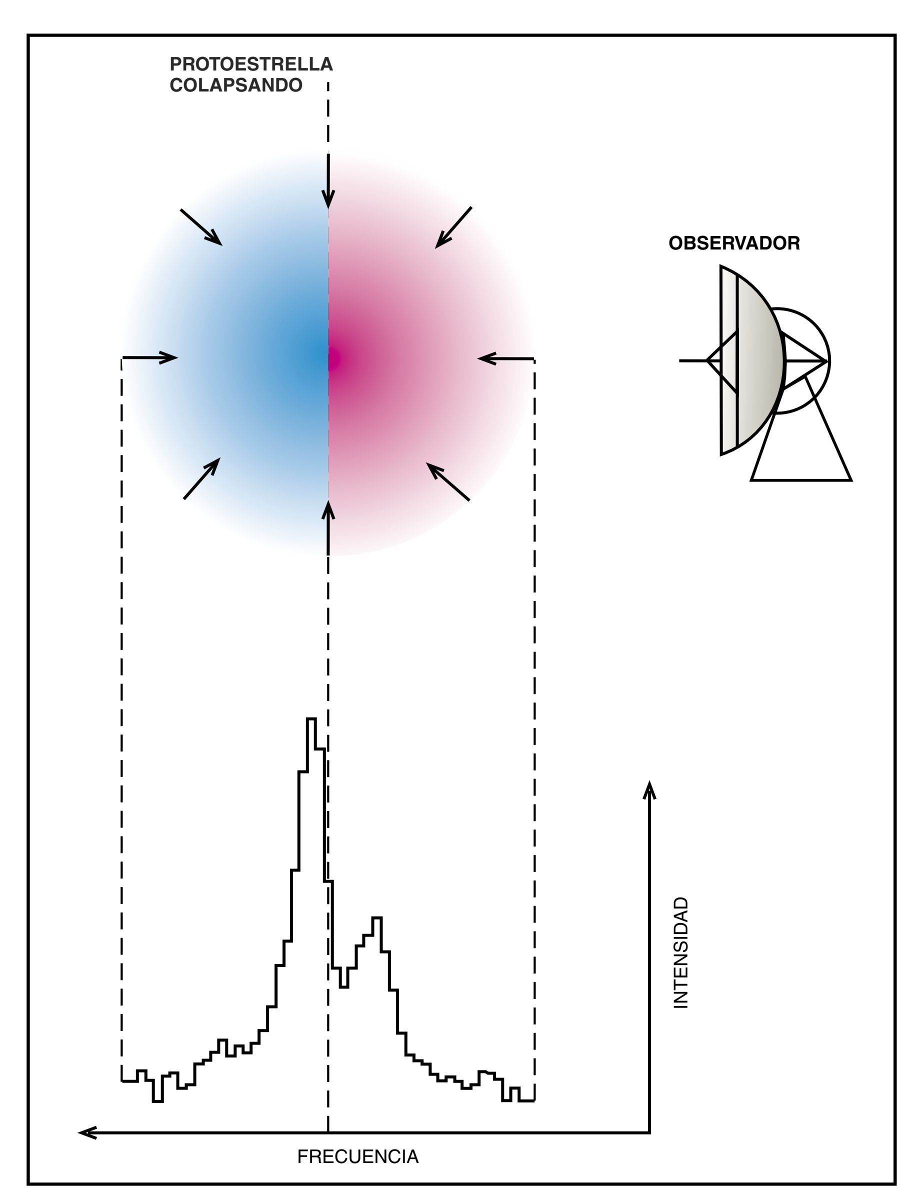
La materia que llega a la vecindad del radio de Alfven sale despedida a lo largo de las líneas de campo, a la manera de cuentas de un collar que se deslizaran por un alambre inclinado que girase rápidamente. En torno al radio de Alfven, el campo magnético actúa como una palanca: lanza el material lejísimos y aporta un potente mecanismo para mantener soplando el viento protoestelar.

Se ha discutido si el origen último del viento se encuentra en el disco circunestelar o nace en la protoestrella. Las últimas investigaciones muestran que el origen podría hallarse en la región de interfase, entre la protoestrella y el disco. Se trata de una zona rica en energía, donde la estrella acreta materia a través del disco; la materia puede permanecer orbitando durante un tiempo en esa región de interfase antes de depositarse sobre la superficie protoestelar. El campo magnético podría detraer parte de la energía de acreción e inyectarla en el viento.

Aunque quedan muchas incógnitas por resolver en el problema de la formación de los vientos protoestelares, está claro que la actividad en forma de eyección (vientos) es directamente proporcional a la de inyección (contracción gravitatoria). Ambos fenómenos han de abordarse a la par.

El modelo clásico de formación estelar, de acuerdo con el cual la estrella resultaba de la concentración progresiva de una nube interestelar, está dejando paso a nuevas teorías, en cuyo marco la contracción gravitatoria, acoplada a la rotación y al campo magnético, produce complicadas estructuras de inyección y eyección de materia. En los nuevos modelos, los movimientos de expansión revisten parejo interés fundamental que los de contracción. Los medios de cálculo actuales no permiten construir todavía modelos acabados y cerrados de esas estructuras tan complejas, ni de su evolución.

Tampoco los medios observacionales han llegado al límite de sus posibilidades. Los nuevos instrumentos que se hallan en fase de diseño o en construcción —telescopios infrarrojos a bordo de aviones o en sondas espaciales, grandes interferómetros de ondas milimétricas— ayudarán a descifrar las claves sutiles que nos envían en su débil radiación los objetos celestes: esos cientos de millones de estrellas que titilan en el cielo de una noche despejada.



10. LOS MOVIMIENTOS DE CONTRACCION que tienen lugar en las protoestrellas de clase 0 dejan su impronta en los perfiles de las líneas moleculares emitidas por el gas. En virtud del corrimiento Doppler, el hemisferio de gas que se encuentra más cerca del observador emite frecuencias ligeramente más bajas (más "rojas") que el hemisferio posterior (*región "azul" en el diagrama*). Por otro lado, debido a que la materia es un tanto opaca a la radiación, la porción más visible de la zona roja es la más alejada del centro de la protoestrella (donde el gas está más frío), mientras que la zona azul más visible es la más cercana a la región central (donde el gas está más caliente). Esta configuración hace que la parte "roja" de la línea espectral se vea, en comparación, menos brillante que la parte "azul". Se trata de asimetrías habituales en los perfiles de numerosas protoestrellas de clase 0, que corroboran la importancia de los movimientos de contracción en dichos objetos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IN DARKNESS BORN: THE STORY OF STAR FORMATION. Martin Cohen. Cambridge University Press, 1988.

PROTOSTARS AND PLANETS. Dirigido por E. H. Levy y J. I. Lunine. University of Arizona Press, 1993.

BIPOLAR MOLECULAR OUTFOWS FROM YOUNG STARS AND PROTOSTARS. Rafael Bachiller en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 34, págs. 111-154; 1996.

El ejercicio de la seducción por las mariposas

Las mariposas descubren, cortejan y conquistan a su pareja utilizando señales seductoras e ingeniosos métodos a los que la evolución ha ido dando forma

Ronald L. Rutowski

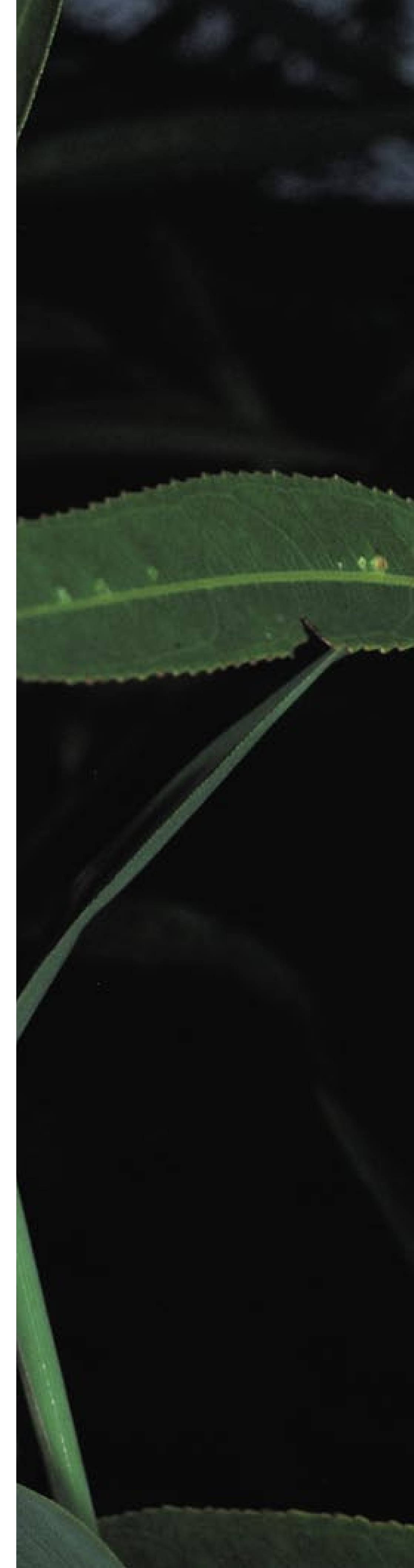
Como todos los adolescentes saben, las claves sensoriales influyen mucho en el interés que despierta una posible pareja. A la vista de un cabello lustroso o de unos ojos penetrantes, un hombre puede quedar prendado de una mujer, o viceversa. La percepción de una fragancia provocadora o de un toque sensual también puede provocar el deseo.

A pesar de los evidentes encantos de Grace Kelly o de Errol Flynn, un observador imparcial podría llegar a la conclusión de que las mariposas tienen mucho más atractivo sensual que los seres humanos. Resulta así menos sorprendente que para ellas mismas sean también las pistas sensoriales, sobre todo las visuales, las que gobiernen sus decisiones de elección de pareja. Lo que está en juego es nada menos que la posibilidad de generar la progenie que porte los genes individuales a través del tiempo.

RONALD L. RUTOWSKI lleva más de un cuarto de siglo estudiando el comportamiento amatorio de las mariposas. Tras obtener el doctorado en la Universidad de Cornell en 1976, pasó a la facultad de la Universidad del Estado de Arizona, donde es profesor y codirector del Programa Ciencia y Sociedad, en el Departamento de Biología. Cuando no anda a la caza de mariposas, le gusta tocar el violín, destilar cerveza e ir en bicicleta.

Aunque Charles Darwin no supiera nada sobre los genes (el trabajo de Gregor Mendel no fue redescubierto hasta principios de 1900), sabía bastante de la sexualidad. Darwin ya adujo en 1871 que las especies tienden a desarrollar atributos y comportamientos que mejoran el cortejo y, por añadidura, el éxito reproductivo. Determinadas características pueden hacer que un individuo resulte más atractivo al sexo opuesto, mientras que hay otras que le permiten triunfar sobre sus competidores. Cuando Darwin propuso esta teoría de la selección sexual pensaba muy concretamente en las mariposas, cuyas vistosas marcas características consideró que podrían influir en la elección de pareja. "Sus colores y sus elegantes diseños se disponen como para ser exhibidos", escribió en *El origen del hombre y la selección en relación al sexo*. "Ello me lleva a suponer que las hembras suelen preferir, o son más atraídas, por los machos más brillantes."

Trabajos experimentales recientes realizados con mariposas han confirmado las sospechas manifestadas por Darwin hace más de un siglo. Ahora se sabe que el color enciende la chispa del interés sexual en algunas especies de mariposas, al igual que lo hacen otras señales sensoriales que se hallaban fuera del alcance de la humana percepción de Darwin. Pero tan pequeñas criaturas tienen una capacidad de discriminación mucho mayor de lo que induciría a pensar esta observación. Una co-





1. LA COPULA es la culminación del cortejo, en el que las pistas visuales y químicas desempeñan un papel esencial. La fotografía muestra la de dos ejemplares de la especie *Colias eurytheme*, una mariposa muy común. La mariposa que se agarra a la hoja es el macho.

loración o una fragancia ostentosas pueden hacer algo más que llamar la atención. El aspecto y el aroma pueden representar mensajes taquigráficos sobre el estado de salud y la actitud amistosa del portador.

Claves cromáticas

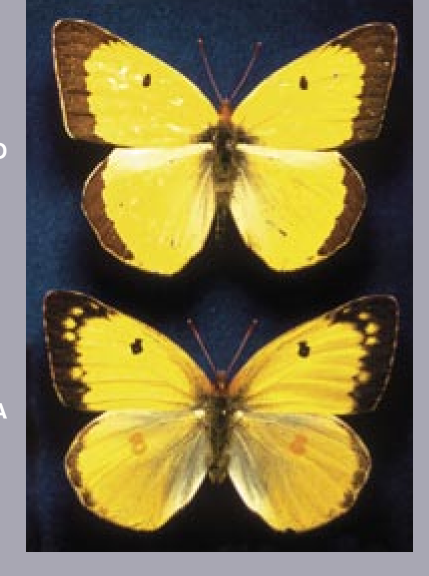
Las pruebas más concluyentes sobre el papel que desempeña el color en la atracción sexual entre mariposas proviene de los estudios realizados con especies en que machos y hembras tienen apariencias netamente distintas. Es evidente que para conseguir una cópula satisfactoria los individuos tienen que poder determinar si un congénere dado tiene o no su mismo sexo. Podría decirse que el resto no son más que detalles.

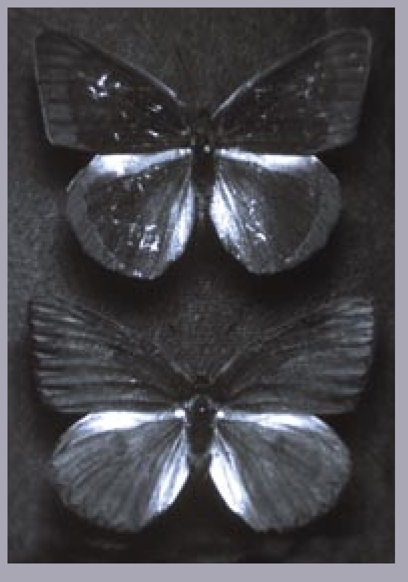
Una magnífica especie de mariposa cuyos machos y hembras son bien distintos en cuanto a la coloración es *Eurema lisa*. A nuestra vista ambos sexos muestran idéntica coloración amarilla, cuyos matices vienen producidos por los pigmentos de las pequeñas escamas que cubren las translúcidas alas de la mariposa. Pero machos y hembras tienen un aspecto bien diferenciado para los ojos de una mariposa, que perciben longitudes de onda luminosas a las que los seres humanos son ciegos, en el rango ultravioleta. Y es que las escamas amarillas de la superficie superior de las alas del macho reflejan la luz ultravioleta, mientras que las de la hembra no lo hacen.

Cuando encuentra una hembra, el macho de *Eurema lisa* revolotea hacia ella brevemente antes de posarse e intentar la cópula. En cambio, si topa con otro macho, cambia de dirección y continúa la búsqueda. Esos comportamientos tan simples me permitieron desarrollar una prueba para estudiar las claves que usa el macho para reconocer a la hembra. Lo primero que hice fue pegar alas de *Eurema lisa* en una tarjeta y presentársela a diversos machos, los cuales se posaban e incluso intentaban copular con las alas de la hembra, mientras que prestaban









2. EL REFLEJO ULTRAVIOLETA del macho de *Colias eurytheme* (*arriba a la derecha*) repele a otros machos y atrae a las hembras; las escamas de las alas de las hembras no reflejan el ultravioleta. Esta diferencia permite que los insectos, que pueden detectar estas longitudes de onda, distingan entre los sexos. Ninguno de los sexos de la especie emparentada *Colias philodice* refleja la luz ultravioleta, por lo que tienen que servirse de otras pistas para identificar a los posibles compañeros. Posiblemente sirvan a esta finalidad los productos químicos que emiten determinadas escamas de las alas de los machos.

escasa atención a las alas de macho montadas de manera similar.

La siguiente fase del experimento puso de manifiesto que el factor responsable de la elección era el color. Preparé una tarjeta con dos juegos de alas de macho. Una ventanilla de cuarzo, que transmite tanto la luz visible como la ultravioleta, cubría uno de los juegos de alas, mientras que el otro lo estaba por un filtro que bloqueaba las longitudes de onda ultravioletas. En tales condiciones los machos intentaron copular con el juego de alas que estaban bajo el filtro, que aparecían como si fueran de hembra. El ya desaparecido Robert E. Silberglied y Orly R. "Chip" Taylor Jr. obtuvieron resultados parecidos con otra mariposa, *Colias eurytheme*. El dimorfismo sexual de esta especie se manifiesta en el reflejo del ultravioleta de forma parecida a lo que sucede con *Eurema lisa*. Cuando se elimina el reflejo ultravioleta de un macho, los otros le tratan como si fuera una hembra.

El color también puede influir en el reconocimiento de la pareja por la hembra. Mi grupo de investigación en la Universidad del Estado de Arizona aprovechó una densa población de la especie *Pontia protodice* situada en una zona rural cercana a Phoenix para estudiar este fenómeno. Centramos nuestra atención en la conocida tendencia de aproximación a los machos que muestran las hembras vírgenes y las que ya llevan algún tiempo sin aparearse, llegando en ocasiones a perseguirlos.

Capturamos ejemplares de *Pontia protodice* de ambos sexos y los sujetamos mediante una ligadura alrededor de la constricción que separa el tórax del abdomen, realizada con el extremo de un hilo, mientras que el otro extremo lo atamos a un alambre rígido. El alambre servía a modo de caña de pescar para exhibir los individuos cautivos ante las hembras libres, las cuales solían lanzarse en su persecución. Los vuelos tras otras hembras terminaban pronto, mientras que su perseverancia era mucho mayor cuando se trataba de machos.

Como ocurre con *Eurema lisa*, el macho y la hembra de *Pontia protodice* tienen una apariencia muy diferente en el ultravioleta, pero en este caso sucede al revés. Las hembras reflejan la luz ultravioleta, mientras que los machos tienen un pigmento que la absorbe. Pero este pigmento puede extraerse fácilmente sumergiendo las alas en una solución amoniacal diluida, tratamiento que hace que reflejen el ultravioleta, como las de las hembras, sin alterar otras características.

Fabriqué modelos muy verosímiles con alas así tratadas y, utilizando la técnica de la caña de pescar, se los presenté a las mariposas libres del campo. Las hembras no prestaron atención a las alas de macho que reflejaban el ultravioleta, pero los machos mostraron gran perplejidad. Quedaba claro que ambos, machos y hembras, usaban diferencias sexuales del color para descartar como parejas potenciales a los individuos de su propio sexo.

Algunas hembras se muestran también bastante quisquillosas con el

color cuando tienen que escoger una pareja entre varios pretendientes. Diane C. Wiernasz investigó este comportamiento en la especie *Pontia occidentalis*, una mariposa estrechamente relacionada con *Pontia protodice*. Liberó hembras vírgenes en un campo y capturó a los machos que las cortejaron con éxito, los cuales presentaban, en la cúspide de sus alas anteriores, unas manchas más oscuras que las de los pretendientes rechazados. También consiguió hacerlos menos atractivos para las hembras usando pintura blanca de modo que se redujera la superficie de las cruciales marcas oscuras. Se trata del único estudio disponible de este tipo, pero demuestra que las diferencias que algunas hembras establecen entre los machos se basan en sutiles variaciones de color.

Las hembras que prefieren machos de mucho colorido pudieran verse recompensadas con la conquista de los compañeros más jóvenes y saludables. Para comprobar esta posibilidad, dedicamos un cálido y húmedo verano a las *Colias eurytheme* de los campos de alfalfa de Arizona. Los estudios realizados en los años setenta habían puesto de manifiesto que las hembras de esta especie se ven atraídas por los reflejos ultravioleta de las alas del macho. Sucede que, a medida que los machos pierden escamas de las alas con la edad, su reflejo ultravioleta disminuye, lo que nos hizo preguntarnos si también perderían su capacidad de seducción con la edad. Nuestras sospechas se vieron confirmadas cuando observamos que las hembras vírgenes realmente preferían a los machos que tenían las alas intactas, una elección aparentemente guiada por el color, que asegura una pareja más joven.

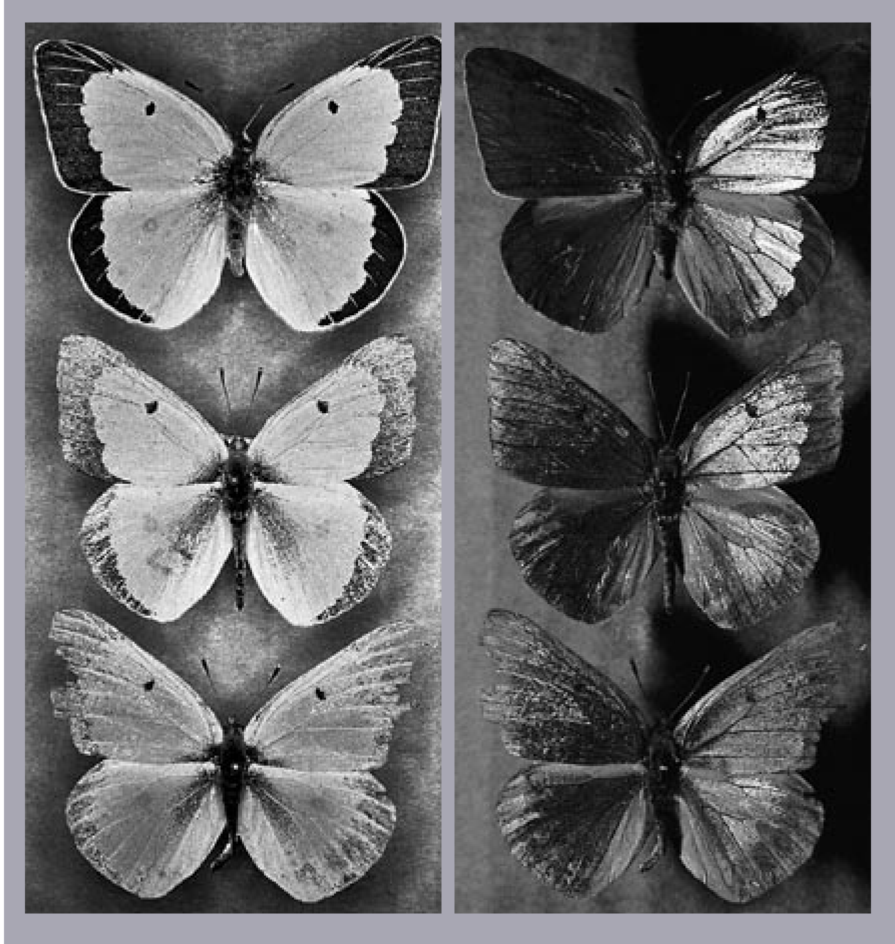
Una química excelente

Una vez producido el encuentro de las mariposas macho y hembra, comienza el cortejo en serio. El macho tiene que conseguir que la hembra se pose y permanezca dispuesta a la cópula, que puede durar una hora o más. Las hembras de algunas especies tienen además que desplazar el abdomen de entre las alas posteriores para permitirle el acceso. Los lepidopterólogos no han estudiado el ritual que precede a la cópula más que en unas pocas docenas de las aproximadamente 12.000 especies de mariposas existentes, pero parece claro que, más que ser un adorno fragante, los olores constituyen para las mariposas el lenguaje del amor. Y su vocabulario es de tipo químico.

El caso mejor conocido de comunicación no visual entre mariposas es el de *Danaus gilippus*. Los machos de esta especie producen feromonas, compuestos cuya función es provocar reacciones específicas —de interés sexual en este caso— en otras mariposas. Tales feromonas se liberan desde unas estructuras en forma de pincel situadas en el extremo del abdomen de los machos, pinceles que presentan una superficie especialmente grande en relación a su pequeño volumen, lo que los convierte en eficaces difusores de sustancias químicas. Cuando un macho vuela arriba y abajo frente a una hembra, toca las antenas de ella con los pinceles que ha extruido y deposita feromonas. La hembra responde a esa señal química posándose y permaneciendo quieta mientras el macho completa la cópula.

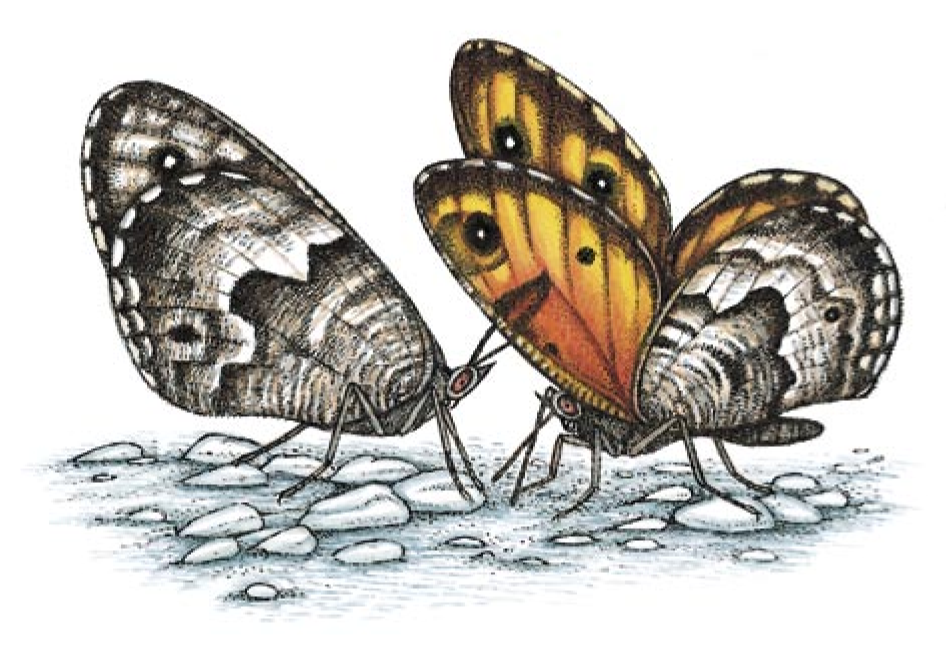
Es probable que sean muchas las especies de mariposa que utilicen feromonas en el cortejo. Los machos suelen poseer estructuras que recuerdan los pinceles de *Danaus gilippus*, como puedan ser acumulaciones de escamas especiales en las alas o grupos apretados de sedas en el abdomen. Como los pinceles, esas escamas y sedas tienen una superficie relativa muy grande, que presumiblemente ayuda en la diseminación de feromonas. Y unas escamas especiales de las alas de los machos de las *Colias*, que suelen tener brillantes colores amarillos y naranjas, emiten productos que puede que influyan en el comportamiento de la hembra.

Ciertas especies de mariposa han desarrollado evolutivamente rituales de cortejo que llevaran a que la hembra resultase expuesta a las feromonas del macho, como sucede con el vuelo arriba y abajo de *Danaus*



3. LA PERDIDA DE ESCAMAS que comporta el envejecimiento del individuo (*de arriba abajo*) disminuye el reflejo ultravioleta de los machos de *Colias eurytheme*, haciéndolos menos atractivos para las hembras.

4. LA PAUTA DE INCLINACION que realiza la especie *Hipparchia semele* pone en contacto las antenas de la hembra con unas escamas pilosas de las alas del macho. Puede que en esas escamas se produzcan sustancias químicas que induzcan a la hembra a aceptar la continuación del cortejo.



gilippus, que hace que los pinceles toquen las antenas. Un macho de la especie *Hipparchia semele*, por ejemplo, se posará directamente frente a una hembra y abrazará las antenas de ella entre sus alas. El macho se inclina lentamente hacia delante, frotando las antenas de la hembra contra una acumulación de escamas que presumiblemente contienen feromonas. El macho de *Eurema daira* se posa cerca de la hembra, hace ondear sus alas anteriores y con su borde recorre las antenas de la hembra a cada balanceo. El macho de *Agraulis vanillae* se sitúa cerca de la hembra y la palmotea con sus alas, abriéndolas y cerrándolas, de modo que las cercanas antenas de la hembra queden muchas veces atrapadas entre las alas del macho y toquen sus escamas pilosas.



Pero hay que reconocer que actuaciones tan elaboradas como las acabadas de mencionar no son la norma en el mundo de las mariposas. El cortejo de muchas especies es fugaz, durando menos de 30 segundos, y consiste sobre todo en un revoloteo del macho alrededor de la hembra. Un cortejo más representativo puede ser el de *Eurema lisa*, consistente en que el macho palmotea a la hembra durante unos segundos antes de posarse e intentar la cópula. Esta actuación tan sencilla puede ser suficiente para lanzar feromonas a la antena de la hembra, haciendo que acceda a ello.

A pesar de los esfuerzos seductores del macho, algunas hembras permanecen indiferentes a todas esas atenciones. Las que hayan copulado hace poco pueden resultar las más obstinadas y tomarán medidas defensivas para desanimar al pretendiente no deseado. Si están posadas, batirán sus alas rápidamente; si están volando, huirán, a veces saliendo disparadas algunos metros hacia lo alto, en una maniobra denominada vuelo ascendente. Si el macho rechazado es pertinaz, el cortejo aéreo resultante puede durar varios minutos. De la misma manera que una dramática historia de conflictos puede resultar más emocionante que





5. LAS SUSTANCIAS atractivas son diseminadas por las estructuras pilosas que posee el macho de *Danaus gilippus* (*la mariposa de arriba en la ilustración de más a la izquierda*), feromonas que se producen a partir de los precursores químicos que el macho obtiene de determinadas plantas, como las Crotalaria (*abajo*).







6. LOS MACHOS DE *ASTEROCAMPA LEILIA* utilizan un método muy sistemático para hallar pareja. No pierden de vista los árboles del género *Celtis*, que son los favoritos de las hembras para completar la metamorfosis (de la cual emergerá la hembra virgen) o para poner los huevos. Los machos se posan por la mañana temprano en el suelo, en un calvero soleado desde el cual puedan vigilar y calentarse al mismo tiempo (*arriba*). Cuando a veces se dirigen a los árboles (*derecha, arriba y abajo*), se sitúan exactamente a la altura a la que suelen volar las hembras.

otra de tediosa armonía, esos conspicuos rechazos suelen atraer más a los aficionados a la observación de mariposas que los fugaces cortejos que conducen a la unión.

Lugares de encuentro

Las alas chillonas, los movimientos suaves y las feromonas no le sirven para nada a un macho de mariposa que no sea capaz de encontrar hembras de su especie sobre las que practicar su poder de seducción. Los de muchas especies siguen un método de búsqueda en vuelo, errando por la campiña a la caza de pareja. Suelen inspeccionar los sitios más favorables, como puedan ser las plantas en que las hembras ponen sus huevos o allí donde emergen hembras vírgenes.

Pero los de *Asterocampa leilia* utilizan un método muy sistemático. Como las larvas se nutren y efectúan la pupación sobre árboles desertícolas del género *Celtis*, y dado que las hembras no se aparean más que una vez durante sus cortas vidas, el macho explora exhaustivamente este tipo de vegetación a la búsqueda de jóvenes vírgenes. Pocas horas después del amanecer, cuando las hembras emergen de sus capullos y se preparan para su primer vuelo, los machos empiezan su ojeo.

Por la mañana temprano ya se han posado en el suelo, en espacios abiertos y soleados cercanos a los árboles. Este temprano baño de sol probablemente sirva para no perder de vista a los otros contendientes mientras calientan sus cuerpos lo suficiente como para iniciar las actividades de caza. (Dado que no pueden regular internamente la temperatura de su cuerpo, las mariposas se muestran indolentes si la ambiental es demasiado fría.) Avanzada la mañana, se dirigen hacia los árboles siguiendo exactamente el mismo plano promedio de vuelo de la hembra de *Asterocampa leilia*, es decir, un metro más o menos por encima del suelo. Mis estudiantes y yo hemos observado que el macho de la mariposa, incluso cuando está posado en un declive, mantiene la cabeza en tal posición que sus ojos miren horizontalmente hacia los árboles. Esta orientación parece asegurar que su área de mayor agudeza visual —que se sitúa en una banda ecuatorial del campo visual— coincida con el probable plano de vuelo de la hembra.

El macho guarda celosamente su territorio durante una o dos horas. Y emprende el vuelo hacia cualquier objeto que se aproxime, ya sea mariposa, pájaro o piedra lanzada al aire. Estos machos vigilantes persiguen a las hembras, interceptan a los competidores y vuelven al mismo sitio donde se hallaban posados. Hay muchas especies de mariposa que muestran un sentido territorial incluso mayor, atribuyéndose territorios de cópula caracterizados, más que por elementos tales como los árboles *Celtis*, por circunstancias geográficas: espacios despejados, calveros soleados, barrancos, gargantas y, sobre todo, las cumbres.

A la pregunta de por qué los machos de mariposa (y de muchos otros insectos) prefieren esos territorios, no podemos responder más que con suposiciones. Los sitios soleados pudieran resultarles atractivos a las hembras para descansar y calentarse, mientras que un lugar despejado podría facilitar los amores a primera vista. El más misterioso de los territorios son las cumbres. Las hembras vírgenes de algunas especies (que no las fecundadas) tienden a

volar montaña arriba, pero el enigma de las causas y efectos evolutivos que pudiera tener tal comportamiento sigue sin resolver.

La panoplia para el cortejo de que dispone la mariposa macho, desde las atractivas alas coloreadas hasta las incitantes feromonas o los ambientes propicios, parece dirigida a lograr tantas cópulas como sea posible. Incluso la preferencia de los machos por las hembras jóvenes tiene su base lógica, ya que la probabilidad estadística que tienen éstas de sobrevivir asegura una progenie máxima.

En el caso de los machos hay un poderoso imperativo, relacionado con el impulso de transmitir su material genético a la próxima generación, que es el de impedir que su pareja copule de nuevo. La mariposa macho aporta muchos recursos a la hembra durante la cópula, ya que le pasa una gran cantidad de nutrientes. Este paquete alimenticio, denominado espermatóforo, puede representar entre el 6 y el 10 por ciento del peso corporal del macho; los machos no pueden permitirse tal inversión en hembras que vayan a utilizar el esperma de un competidor suyo para fertilizar los huevos [*véase* "Regalos glandulares", por Darryl T. Gwynne; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1997]. De hecho, la evolución ha desarrollado un mecanismo que favorece al macho que ha conseguido copular el primero. La presencia del espermatóforo en el tracto reproductivo de la hembra provoca que ésta sea insensible a otros contactos sexuales, como demuestran los datos experimentales. Si se rellena artificialmente el tracto reproductivo de una hembra virgen, ésta pierde interés en la cópula, mientras que si se seccionan las conexiones nerviosas de esa área en una hembra fecundada, se restaura su interés sexual. Hay otra técnica usada por los machos para bloquear el acceso de competidores a su pareja, pero es más tosca, pues consiste en sellar el tracto reproductivo con un tapón.

Las hembras se enfrentan a presiones evolutivas de naturaleza diferente. A menudo no disponen más que de una posibilidad de cópula, por lo que deben ser extremadamente selectivas. Aceptando solamente al macho más apto, la hembra puede asegurarle a su progenie una dote genética de calidad, al tiempo que puede asegurarse ella misma un espermatóforo más generoso, lo cual puede ayudar a que tenga una vida más larga y a que ponga una cantidad de huevos mayor. Los colores del macho, las feromonas y las exhibiciones de cortejo pueden permitir a la hembra juzgar las aptitudes para el éxito biológico de sus pretendientes. Sospechamos que las señales químicas indican la calidad de la dieta del macho: la feromona sexual más importante del macho de *Danaus gilippus*, por ejemplo, no se produce más que cuando ha comido determinadas especies de plantas. Y los colores brillantes pudieran ser indicio de que el portador es más joven y más vigoroso.

Como sucede en el caso de los seres humanos, algunos de los rasgos y comportamientos del cortejo de las mariposas son bastante elaborados, mientras que otros son muy pedestres. Complicados o simples, el cortejo y la cópula constituyen los mecanismos por los que se ejecutan la supervivencia y la evolución. El observador que se topa con una abundante colonia de mariposas monarca copulando en las montañas de México central o el que presencia el jugueteo entre dos mariposas de la alfalfa en el jardín de su casa tiene la suerte de contemplar no sólo los resultados, sino el propio curso de la evolución.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE EVOLUTION OF INSECT MATING SYSTEMS. R. Thornhill y J. Alcock. Harvard University Press, 1983.

THE BIOLOGY OF BUTTERFLIES. Dirigido por P. Ackery y R. Vane-Wright. Academic Press, 1984.

THE DEVELOPMENT AND EVOLUTION OF BUTTERFLY WING PATTERNS. H. F. Nijhout. Smithsonian Institution Press, 1991.

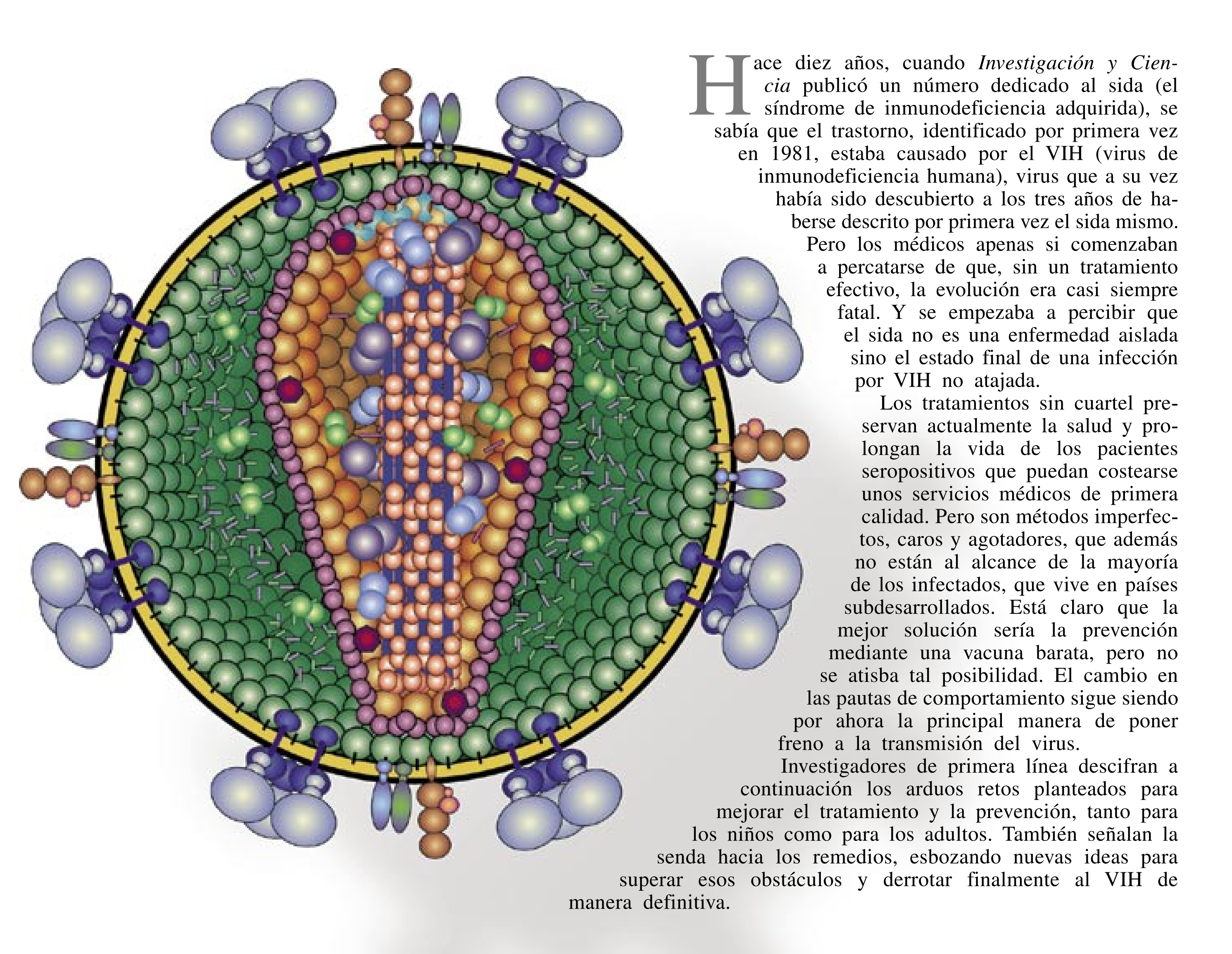
THE EVOLUTION OF MATE-LOCATING BEHAVIOR IN BUTTERFLIES. R. L. Rutowski en *American Naturalist*, vol. 138, n.º 5, págs. 1121-1139; noviembre 1991.

QUESTIONS ABOUT BUTTERFLY BEHAVIOR: THE CASE OF THE EMPRESS LEILIA. R. L. Rutowski en *American Butterflies*, vol. 2, págs. 20-23; mayo 1994.

SEXUAL DIMORPHISM, MATING SYSTEMS, AND ECOLOGY IN BUTTERFLIES. R. L. Rutowski en *Evolution of Mating Systems in Insects and Arachnids*. Dirigido por Jae C. Choe y Bernard J. Crespi. Cambridge University Press, 1997.

INFORME ESPECIAL

La derrota del sida y sus requisitos



Hace diez años, cuando *Investigación y Ciencia* publicó un número dedicado al sida (el síndrome de inmunodeficiencia adquirida), se sabía que el trastorno, identificado por primera vez en 1981, estaba causado por el VIH (virus de inmunodeficiencia humana), virus que a su vez había sido descubierto a los tres años de haberse descrito por primera vez el sida mismo. Pero los médicos apenas si comenzaban a percatarse de que, sin un tratamiento efectivo, la evolución era casi siempre fatal. Y se empezaba a percibir que el sida no es una enfermedad aislada sino el estado final de una infección por VIH no atajada.

Los tratamientos sin cuartel preservan actualmente la salud y prolongan la vida de los pacientes seropositivos que puedan costearse unos servicios médicos de primera calidad. Pero son métodos imperfectos, caros y agotadores, que además no están al alcance de la mayoría de los infectados, que vive en países subdesarrollados. Está claro que la mejor solución sería la prevención mediante una vacuna barata, pero no se atisba tal posibilidad. El cambio en las pautas de comportamiento sigue siendo por ahora la principal manera de poner freno a la transmisión del virus.

Investigadores de primera línea descifran a continuación los arduos retos planteados para mejorar el tratamiento y la prevención, tanto para los niños como para los adultos. También señalan la senda hacia los remedios, esbozando nuevas ideas para superar esos obstáculos y derrotar finalmente al VIH de manera definitiva.

Panorámica del sida en 1998

Jonathan M. Mann y Daniel J. M. Tarantola

Los grupos humanos más afectados por el virus suelen ser los que disponen de menos medios para afrontarlo eficazmente

Tras más de un decenio de ascenso sin tregua, las muertes por sida acabaron menguando en los Estados Unidos en 1996. La caída parece deberse sobre todo a la implantación de potentes tratamientos capaces de retardar la actividad del VIH, el virus responsable de la enfermedad. Lo mismo está sucediendo en otras naciones económicamente aventajadas, como Francia y Gran Bretaña, pero la tendencia de los países industrializados no es representativa del resto del mundo.

La pandemia internacional de la infección por VIH y de sida (compuesta de miles de epidemias separadas que afectan a grupos humanos diseminados a lo largo y ancho del mundo) se expande con rapidez, particularmente en los países subdesarrollados, donde reside la mayoría de la gente. Más de 40 millones de individuos han sido contagiados por el VIH desde principios de los años ochenta y casi 12 millones han muerto (dejando al menos 8 millones de huérfanos), según UNAIDS, un programa patrocinado por las Naciones Unidas. Sólo en 1997, unos seis millones de personas —cerca de 16.000 por día— adquirieron el VIH y unos 2,3 millones sucumbieron a él, entre ellos 460.000 niños.

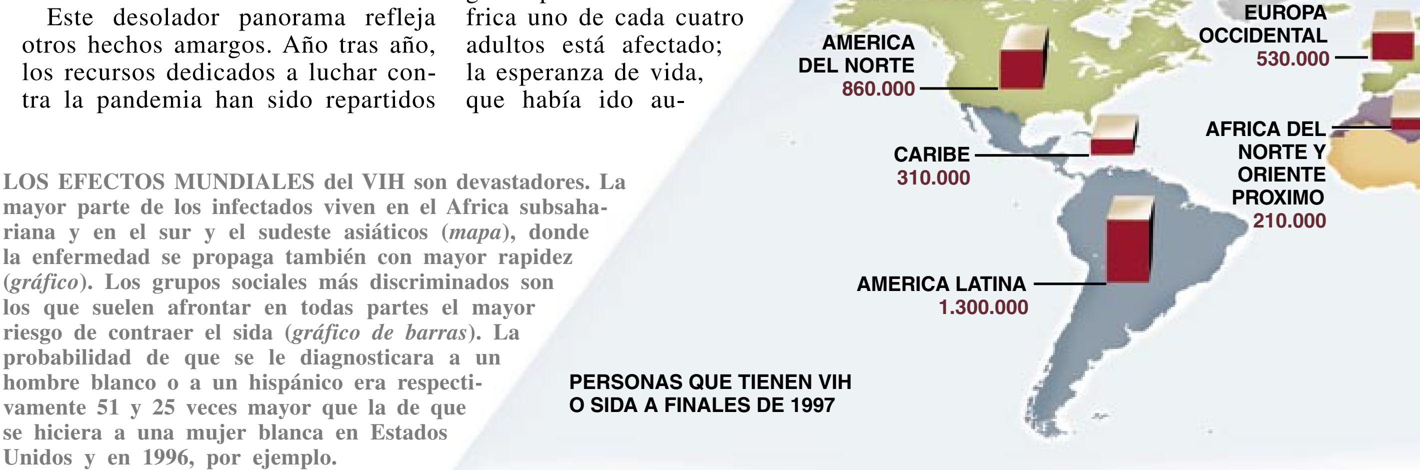
Este desolador panorama refleja otros hechos amargos. Año tras año, los recursos dedicados a luchar contra la pandemia han sido repartidos con sesgos sociales. Aunque más del noventa por ciento de la gente infectada viva en países subdesarrollados, bastante más del noventa por ciento del dinero destinado a tratamiento y prevención se gasta en los países industrializados. Esta disparidad explica por qué las nuevas terapias para doblegar al VIH, que cuestan más de un millón y medio de pesetas al año por paciente, no han tenido repercusiones en los países subdesarrollados, países que carecen de lejos de las infraestructuras y de la solvencia necesarias para proporcionar las medicinas. Hay unos pocos lugares del mundo subdesarrollado, sobre todo algunas partes de Uganda y de Tailandia, en que las campañas de salud pública parece que hacen declinar la tasa de infección. Pero son las excepciones, pues en los demás sitios la situación empeora.

La propagación del VIH es especialmente rápida en el Africa subsahariana y en el sudeste asiático. La zona situada al sur del Sahara alberga ahora las dos terceras partes de la población mundial infectada por el VIH y alrededor del 90 por ciento de todos los niños infectados. En algunas regiones de Botswana y de Swazilandia y en algunas provincias de Sudáfrica uno de cada cuatro adultos está afectado; la esperanza de vida, que había ido aumentando desde 1950, está bajando en muchas naciones africanas. De la propagación del VIH en el Africa subsahariana tienen gran parte de culpa las relaciones heterosexuales sin protección, pero el problema se complica con la contaminación de las transfusiones de sangre. Al menos la cuarta parte de los 2,5 millones de unidades de sangre administradas en Africa (la mayor parte a mujeres y niños) no pasan ningún examen para detectar si tienen el virus del sida.

La palma del sudeste asiático se la llevan la India, donde los afectados son entre tres y cinco millones, y Tailandia. Ahora también está haciendo estragos en Birmania y se expande más allá, por Vietnam y China.

Dentro de cada país se reproduce la misma dicotomía que entre naciones desarrolladas y subdesarrolladas, habiendo determinados grupos sociales que sufren un número desproporcionado de infecciones. Los epidemiólogos se han sentido desolados al descubrir un factor social que influye en la distribución: aquellos grupos cuyos derechos humanos son menos respetados son los más afectados. A medida que va tomando cuerpo en sociedades y países, la epidemia suele desplazarse desde los grupos en que apareció originariamente hacia los que estaban marginados o discriminados socialmente antes de que empezara.

Los discriminados (ya sea en razón de su sexo, de su raza, de su situación económica o a causa de su



LOS EFECTOS MUNDIALES del VIH son devastadores. La mayor parte de los infectados viven en el Africa subsahariana y en el sur y el sudeste asiáticos (*mapa*), donde la enfermedad se propaga también con mayor rapidez (*gráfico*). Los grupos sociales más discriminados son los que suelen afrontar en todas partes el mayor riesgo de contraer el sida (*gráfico de barras*). La probabilidad de que se le diagnosticara a un hombre blanco o a un hispánico era respectivamente 51 y 25 veces mayor que la de que se hiciera a una mujer blanca en Estados Unidos y en 1996, por ejemplo.

JONATHAN M. MANN y DANIEL J. M. TARANTOLA son coeditores del informe de 1996 *Sida en el mundo II* y, hasta hace poco, eran colegas en el Centro de Derechos Humanos y de Sanidad François-Xavier Bagnoud en la Escuela de Salud Pública de Harvard. Tarantola es director del Programa Internacional del sida en el centro y copresidente fundador de la red internacional MAP (Vigilancia de la Pandemia del Sida).

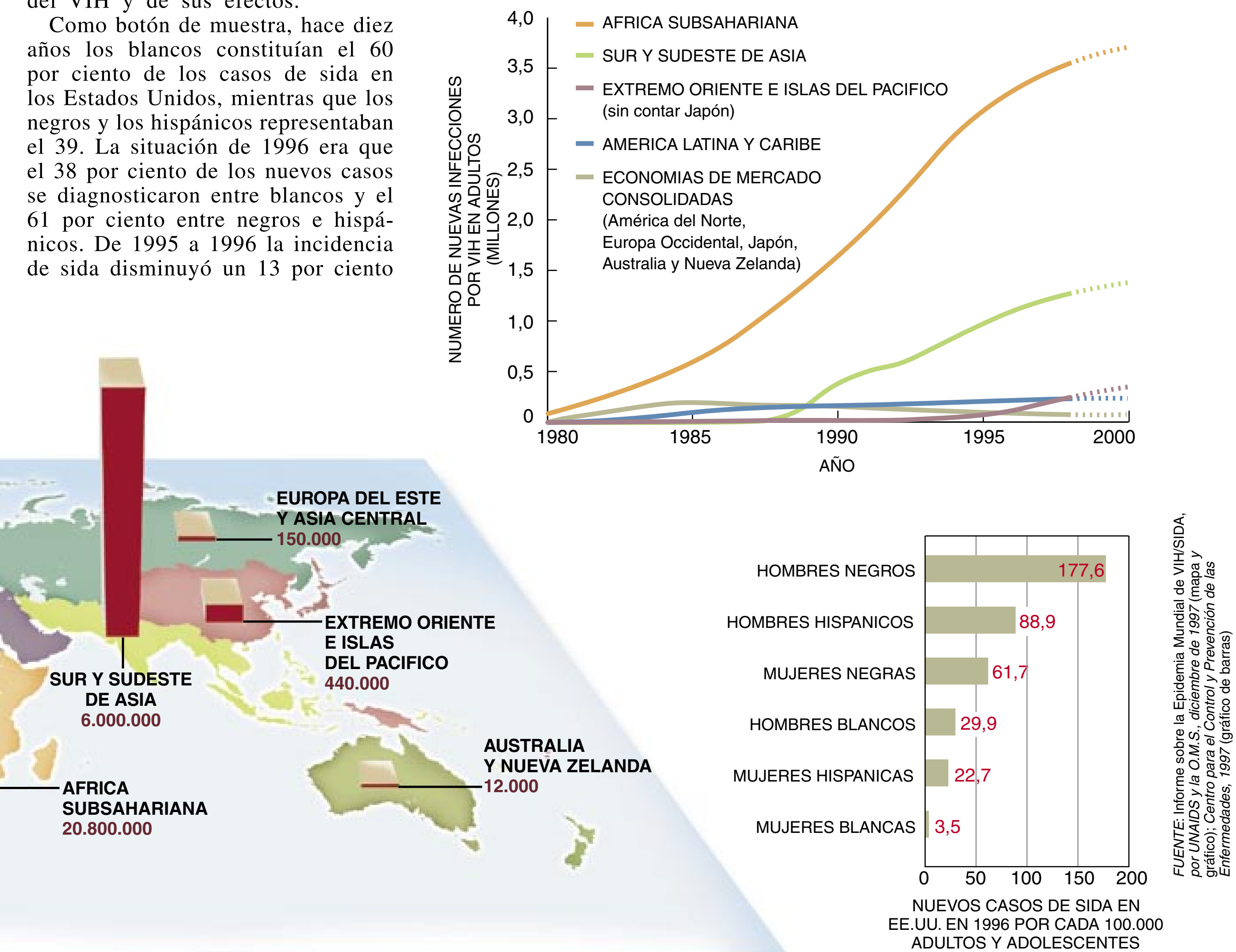
afiliación cultural, religiosa o política) verán limitado o impedido su acceso a la información preventiva y a los servicios sanitarios y sociales, resultando particularmente vulnerables a la explotación sexual o de otros tipos. Si acaban por infectarse, luego se les negarán igualmente los cuidados necesarios y el apoyo social. La exclusión, por tanto, continúa su curso sin encontrar resistencia, acrecentando la susceptibilidad del individuo y, como resultado, la vulnerabilidad colectiva a la difusión del VIH y de sus efectos.

Como botón de muestra, hace diez años los blancos constituían el 60 por ciento de los casos de sida en los Estados Unidos, mientras que los negros y los hispánicos representaban el 39. La situación de 1996 era que el 38 por ciento de los nuevos casos se diagnosticaron entre blancos y el 61 por ciento entre negros e hispánicos. De 1995 a 1996 la incidencia de sida disminuyó un 13 por ciento entre los blancos y nada entre los negros.

La marginación social, manifestada en la falta de oportunidades educativas y económicas, también aumenta el riesgo en los países subdesarrollados. En Brasil, por ejemplo, el grueso de los casos afectaba a personas que poseían al menos estudios escolares secundarios; más de la mitad de los casos se declaran ahora en personas que no han realizado más que estudios primarios, o ni siquiera eso. Las mujeres (que representan el 40 por ciento de las infecciones por VIH) tienen una posición social baja en gran parte del mundo y carecen de poder para reclamar el uso de preservativos o de otras prácticas que hagan más seguros los contactos sexuales; no podrán protegerse mientras no se eleve su posición social. UNAIDS, consciente de las raíces sociales de la vulnerabilidad al VIH y al sida, ha incluido el progreso de los derechos humanos entre sus directrices mundiales de prevención.

¿Qué nos deparará el futuro? A corto plazo parece probable que la epidemia internacional se concentre todavía más en los países subdesarrollados (es decir, en el hemisferio sur), donde continuará su expansión. Se darán nuevas epidemias explosivas (como las de Africa meridional y Camboya), mientras que en otras regiones se propagará más lentamente. Y el ya oneroso fardo de la atención sanitaria crecerá enormemente.

La epidemia frenará su avance en las naciones industrializadas, al menos entre ciertos grupos, pero se cobrará más víctimas entre los marginados socialmente. El coste sanitario crecerá de manera importante a medida que un mayor número de individuos reciba tratamientos complicados. Tanto en el hemisferio norte como en el sur, los intentos de corregir las tendencias que acentúan la vulnerabilidad a la infección por VIH procederán con paso cansino, a contracorriente de una resistencia significativa por parte de las elites sociales.



FUENTE: Informe sobre la Epidemia Mundial de VIH/SIDA, por UNAIDS y la O.M.S., *diciembre de 1997* (mapa y gráfico); *Centro para el Control y Prevención de las Enfermedades, 1997* (gráfico de barras)

Progresos terapéuticos

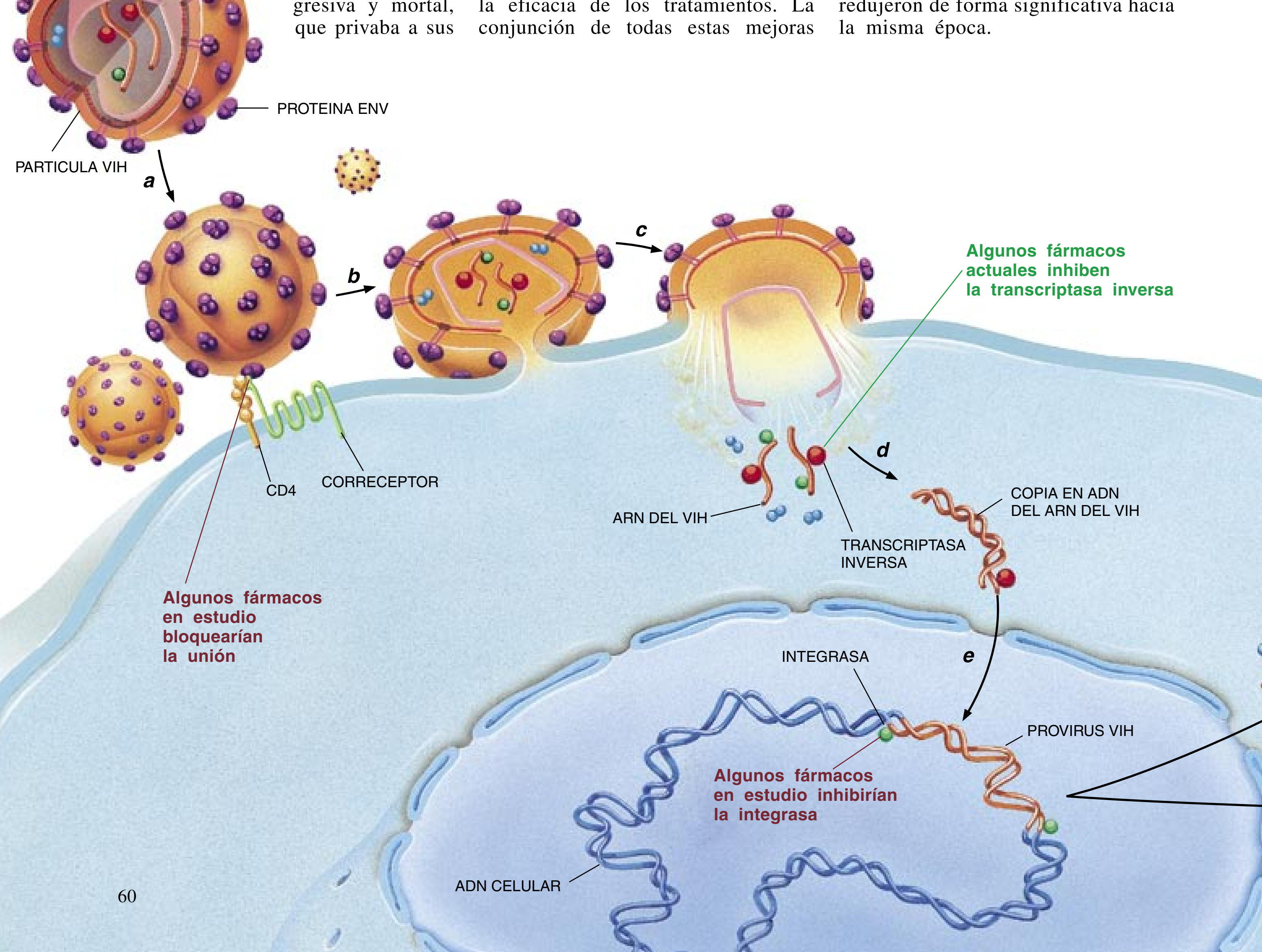
John G. Bartlett y Richard D. Moore

Disponer de una vacuna sería, desde luego, lo ideal para evitar la infección por el VIH e impedir el sida, el último estadio de la infección, que se produce cuando ya hay un grave deterioro de la inmunidad. Pero las perspectivas de desarrollo de una vacuna a corto plazo son poco alentadoras y las personas afectadas necesitan recibir atención. Son muchos los investigadores que, en consecuencia, se centran de momento en la consecución de mejoras en el tratamiento.

Hasta no hace muchos años la infección por el VIH era nuestra peor pesadilla, ya que era invariablemente una enfermedad progresiva y mortal, que privaba a sus víctimas de toda dignidad. Las actuaciones médicas no pretendían dominar al propio VIH, sino tratar las neumonías y el resto de las infecciones "oportunistas" graves resultantes del fracaso inmunológico.

Pero las expectativas de la mayoría de los pacientes tratados han cambiado mucho desde finales de 1995 por una serie de factores. Se dispone de un conocimiento mucho más completo de cómo se comporta el VIH en el organismo y se comprende mucho mejor la forma de domeñarlo. Dos nuevas clases de potentes fármacos han venido a unirse al arsenal de la lucha contra el VIH y se han desarrollado análisis que pueden registrar directamente los niveles del virus, lo que permite evaluar con rapidez la eficacia de los tratamientos. La conjunción de todas estas mejoras ha hecho posible la lucha directa contra la infección, permitiendo mejorar la salud y la supervivencia de los pacientes, al menos en los países industrializados, donde este tipo de tratamiento es en general asequible.

Los signos de este viraje fueron inicialmente anecdóticos: historias cada vez más frecuentes de personas que eran recogidas de la antesala de la muerte para reanudar vidas llenas de vigor y productivas. Las estadísticas han corroborado luego las anécdotas. Entre la primera mitad de 1996 y la de 1997, los fallecimientos a causa del sida han disminuido un 44 por ciento en Estados Unidos. La frecuencia de hospitalizaciones relacionadas con el VIH y con las principales complicaciones de la infección también se redujeron de forma significativa hacia la misma época.



Diríase que los mejores tratamientos disponibles obrasen milagros, pero son muy caros y no funcionan con todos los pacientes. ¿Qué deparará el futuro?

Los conocimientos científicos y los tratamientos siguen estando muy lejos de ser perfectos, a pesar de todo. Por ejemplo, no se sabe si podrán mantenerse estas impresionantes respuestas a los tratamientos. El tratamiento es pesado y costoso, lo que lo pone fuera del alcance de ciertos pacientes, aparte de que hay personas que, aun recibiendo la mejor atención disponible, responden mal. Todas estas razones hacen que se sigan buscando tratamientos de eficacia y accesibilidad mayores.

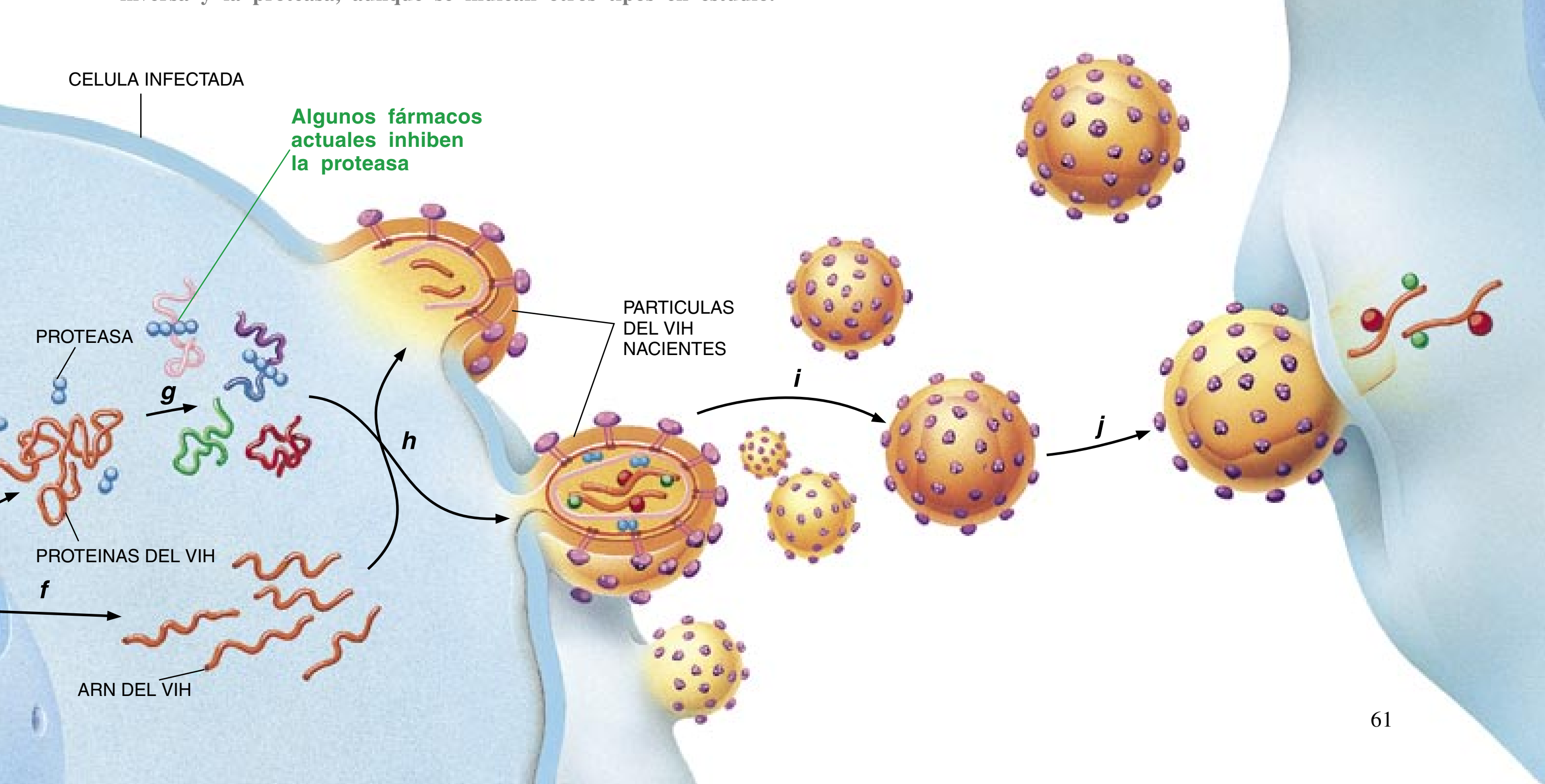
El objetivo último es, por supuesto, la curación, pero no es seguro que sea factible. Somos muchos quienes mantenemos una actitud de cauto optimismo, convencidos de que se está empezando a disponer de la panoplia necesaria para reducir el VIH a una enfermedad crónica soportable, algo parecido a la diabetes y la hipertensión.

Las directrices de un tratamiento óptimo buscan interrumpir indefinidamente la replicación vírica (algo inconcebible hace tan sólo tres años). Para cumplir este objetivo, los pacientes deben tomar por lo general hasta tres o cuatro medicinas cuidadosamente seleccionadas dos o más veces al día, siguiendo con exactitud las prescripciones del médico. Estas pautas generales, y las recomendaciones más específicas, derivan del conocimiento actual de la actividad del VIH en los pacientes no tratados.

El virus suele propagarse de una persona a otra mediante las relaciones sexuales, la exposición directa a la sangre contaminada o por transmisión de la madre al feto o al lactante. Una vez en el organismo, el VIH invade ciertas células del sistema inmunológico (entre ellas, los linfocitos *T* CD4, o auxiliares), se replica en su interior y se propaga a otras células. (Estos linfocitos, que deben su nombre a que despliegan una molécula denominada CD4 en su superficie, desempeñan un papel central en la inmunidad.)

Al principio de una infección, la gran replicación del virus y la muerte de las células *T* CD4 se ponen de manifiesto por los grandes niveles de VIH presentes en la sangre y por una disminución notable de la concentración de células *T* CD4, cuyo nivel normal es de 800 por milímetro cúbico de sangre como mínimo. Cuando se llevan unas tres semanas de esta fase aguda, muchas personas muestran síntomas que recuerdan a la mononucleosis, como fiebre, aumento de tamaño de los

1. EL CICLO VITAL DEL VIH empieza cuando el virus se une a la superficie celular (*a*), se funde con la membrana (*b*) y vacía su contenido en la célula (*c*). La enzima transcriptasa inversa del VIH copia luego el material genético vírico del ARN en un ADN de doble cadena (*d*), que otra enzima del VIH (la integrasa) introduce en el ADN celular (*e*). Utilizando el ADN integrado, o provirus, como un anteproyecto, la célula fabrica proteínas víricas y ARN (*f*). Una tercera enzima, la proteasa del VIH, escinde las nuevas proteínas (*g*), permitiéndolas unirse al ARN y formar nuevas partículas víricas (*h*), que salen por gemación de la célula (*i*) e infectan otras células (*j*). Los actuales fármacos anti-VIH se proponen detener la replicación vírica inhibiendo la transcriptasa inversa y la proteasa, aunque se indican otros tipos en estudio.



JOHN G. BARTLETT y RICHARD D. MOORE son compañeros en la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins. Bartlett es profesor de medicina, jefe de la división de enfermedades infecciosas y director del servicio de sida de la universidad. Es también copresidente del panel que redactó y mantiene actualizadas las normas estadounidenses de utilización de los fármacos anti-VIH en adultos y adolescentes. Moore es profesor asociado de medicina interna, enfermedades infecciosas y farmacología clínica en la Johns Hopkins y es también director del programa de farmacoepidemiología y farmacoeconomía de esa universidad.

ganglios linfáticos, exantema, dolores musculares y cefaleas. Estas dolencias se resuelven en otro período de una a tres semanas, a medida que el sistema inmune empieza a ejercer cierto control sobre el virus. La población de células *T* CD4 responde estimulando a otras células de la inmunidad (los linfocitos *T* CD8, o citotóxicos) para que intensifiquen la destrucción de las células infectadas, productoras de virus. El organismo produce también moléculas de anticuerpo en un esfuerzo por contener al virus, moléculas que se unen a partículas sueltas de VIH (situadas fuera de las células) y ayudan a su eliminación.

Pese a toda esta actividad, es raro que el sistema inmunitario elimine por completo el virus, suponiendo que suceda alguna vez. La tasa de replicación vírica alcanza un mínimo en el plazo de unos seis meses, manteniéndose relativamente estable y alcanzando una especie de "punto de equilibrio". Este punto varía mucho de un paciente a otro y dicta el ritmo posterior de progresión de la enfermedad; como media, pasan de ocho a diez años antes de que se desarrolle una complicación importante relacionada con el VIH. Durante este estadio crónico y prolongado los pacientes se sienten bien y no muestran síntomas o muestran pocos.

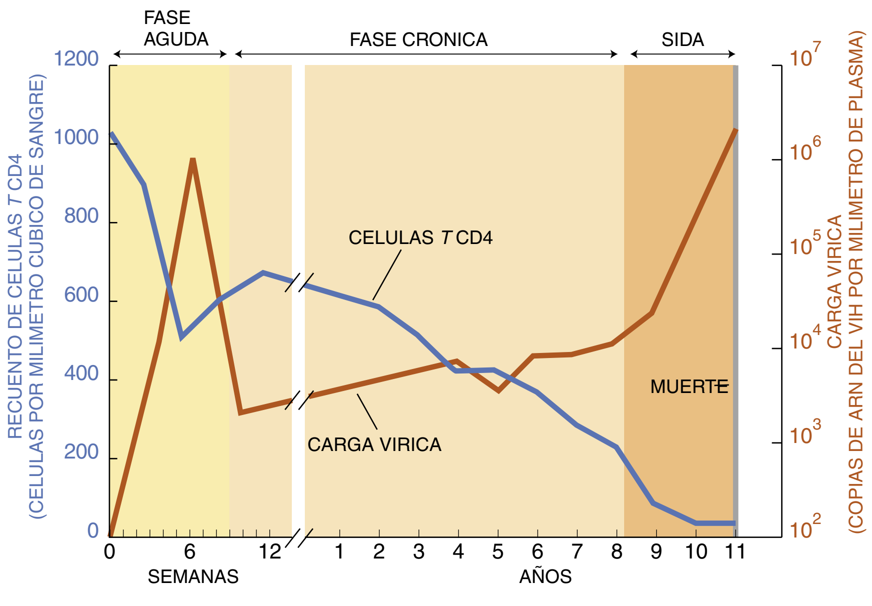
Esta aparente buena salud se debe a que los niveles de células *T* CD4 siguen siendo lo suficientemente altos como para conservar las respuestas defensivas a otros agentes patógenos. Pero, con el tiempo, las concentraciones de células *T* CD4 van disminuyendo de manera gradual. Cuando el nivel cae por debajo de 200 células por milímetro cúbico de sangre es cuando se dice que los enfermos tienen sida.

Cuando los niveles descienden de 100, el sistema inmune se encuentra desbordado. La concentración del VIH se dispara y empiezan a proliferar los microorganismos que en condiciones normales serían mantenidos a raya, dando lugar a las infecciones oportunistas y potencialmente mortales que son el signo patognomónico del sida (como la neumonía por *Pneumocystis carinii* y la toxoplasmosis). Una vez que aparecen estas enfermedades, el sida suele resultar mortal en un año o dos. (A veces estas infecciones aparecen antes de que el nivel de células *T* CD4 caiga por debajo de 200, lo que hace que se diagnostique sida con independencia de cualquier otra consideración.)

Aunque lo normal es que los pacientes sobrevivan a la infección por el VIH durante una decena de años, el curso de la enfermedad varía enormemente. Los hay que mueren al año de la infección, mientras que entre un 4 y un 7 por ciento mantiene recuentos completamente normales de células *T* CD4 durante ocho años o más y sobrevive más de veinte años.

También sabemos cómo el VIH invade y destruye los linfocitos *T* CD4 al nivel celular. El virus consigue acceder al interior de estas y de algunas otras células uniéndose al propio CD4 y a otra molécula, un "coreceptor", de la superficie celular. Esa unión le permite fusionarse con la membrana celular y liberar su contenido en el citoplasma. Dicho contenido lo forman varias enzimas y dos hebras de ARN portadoras, cada una, del genoma entero del VIH, es decir, del anteproyecto genético para fabricar nuevas partículas del virus.

Una de las enzimas, la transcriptasa inversa, copia el ARN del VIH en un ADN de doble hebra (propiedad que le encuadra dentro de los "retrovirus"). Luego una segunda enzima, la integrasa, ayuda a empalmar permanentemente el ADN del VIH a un cromosoma de la célula huésped. Cuando una célula *T* en cuyo interior se encuentre este ADN integrado (o provirus) entra en actividad para atacar al VIH o a cualquier otro microorganismo, se reproduce y, sin pretenderlo, empieza a producir nuevas copias del genoma y de las proteínas del virus, momento en que otra enzima del VIH (una proteasa) corta las nuevas moléculas de proteína en fragmentos que son



Fuente: Anthony Fauci et al. *en* Annals of Internal Medicine, *vol. 124; 1996*

2. CURSO NATURAL DE LA INFECCION POR VIH en un paciente típico no tratado: empieza con un notable aumento de la concentración sanguínea del virus (*línea naranja*) y una disminución consiguiente de las células *T* CD4 (*línea azul*), que son las más dañadas del sistema inmune. Pero éste logra pronto recuperarse algo y mantiene los niveles de VIH bastante estables durante algunos años. Al final, no obstante, el virus gana la partida. Se diagnosticará sida cuando el nivel de células *T* CD4 caiga por debajo de 200 células por milímetro cúbico de sangre o cuando aparezcan las infecciones oportunistas (que reflejan el fallo de la inmunidad).

Fármacos anti-VIH comercializados en la actualidad*

Nombre genérico (otros nombres)	Dosificación típica	Algunos posibles efectos secundarios
Inhibidores de la transcriptasa inversa: análogos de nucleósidos		
Didanosina (Videx, ddI)	2 pastillas, 2 veces al día con el estómago vacío	Náuseas, diarrea, inflamación pancreática, neuropatía periférica
Lamivudina (Epivir, 3TC)	1 pastilla, 2 veces al día	Por lo general, ninguno
Stavudina (Zerit, d4T)	1 pastilla, 2 veces al día	Neuropatía periférica
Zalcitabina (HIVID, ddC)	1 pastilla, 3 veces al día	Neuropatía periférica, inflamación de la boca, inflamación pancreática
Zidovudina (Retrovir, AZT)	1 pastilla, 2 veces al día	Náuseas, cefalea, anemia, neutropenia (reducción de los niveles de neutrófilos), debilidad, insomnio
La pastilla contiene lamivudina y zidovudina (Combivir)	1 pastilla, 2 veces al día	Los mismos que la zidovudina
Inhibidores de la transcriptasa inversa: no análogos de nucleósidos		
Delavirdina (Rescriptor)	4 pastillas, 3 veces al día (mezcladas con agua); no pueden tomarse durante la hora siguiente a la utilización de antiácidos o de didanosina	Exantema, cefalea, hepatitis
Nevirapina (Viramune)	1 pastilla, 2 veces al día	Exantema, hepatitis
Inhibidores de la proteasa		
Indinavir (Crixivan)	2 pastillas, 3 veces al día, con el estómago vacío o con algo de comida de poco contenido graso y después de dos horas de haber tomado didanosina	Cálculos renales, náuseas, cefalea, visión borrosa, vértigo, exantema, sabor metálico de la boca, distribución anómala de la grasa, niveles elevados de triglicéridos y de colesterol, intolerancia a la glucosa
Nelfinavir (Viracept)	3 pastillas, 3 veces al día con algo de comer	Diarrea, distribución anómala de la grasa, niveles elevados de triglicéridos y de colesterol, intolerancia a la glucosa
Ritonavir (Norvir)	6 pastillas, 2 veces al día (o 4 pastillas dos veces al día si se toma con saquinavir) con alimento y dos horas después de haber tomado didanosina	Náuseas, vómitos, diarrea, dolor abdominal, cefalea, sensación de picazón en la piel, hepatitis, debilidad, distribución anómala de la grasa, niveles elevados de triglicéridos y de colesterol, intolerancia a la glucosa
Saquinavir (Invirasa, una cápsula de gel duro; Fortovasa, una cápsula de gel blando)	6 pastillas, 3 veces al día (o 2 pastillas dos veces al día si se toma con ritronavir) con comida abundante	Náuseas, diarrea, cefalea, distribución anómala de la grasa, niveles elevados de triglicéridos y de colesterol, intolerancia a la glucosa

*En abril de 1998

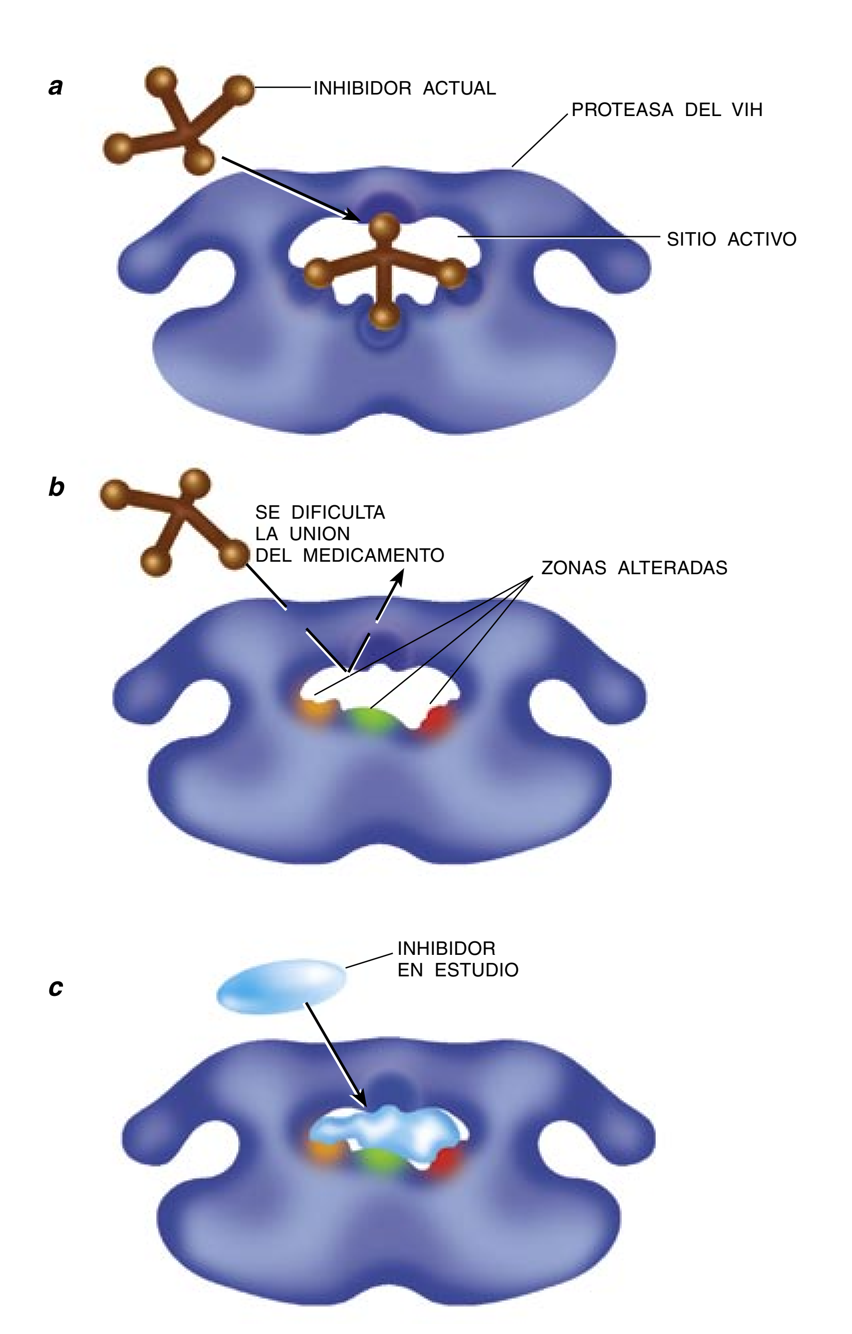
3. A PESAR DEL NUMERO CRECIENTE de medicamentos disponibles, los tratamientos más eficaces son complicados y molestos. Hay que acordarse de tomar muchas píldoras al día, unas veces en ayunas y otras no. Se producen contraindicaciones entre ellos y tienen desagradables efectos secundarios. Los distintos planes varían en el número de pastillas que conllevan, que van de ocho a veinticuatro.

empaquetados con el genoma ARN del virus para formar nuevas partículas víricas. Estas partículas salen por gemación de la célula e infectan otras células. Si se forman suficientes de ellas, pueden saturar la célula que las produjo y matarla.

Todos los medicamentos anti-VIH, o antirretrovíricos, aprobados intentan detener la replicación del virus dentro de las células inhibiendo la transcriptasa inversa o la proteasa del VIH. Dos clases de fármacos inhiben la transcriptasa inversa y, por tanto, se adelantan a la integración genética y la impiden. Los agentes de una de esas clases, los análogos de nucleósido, se parecen a las sustancias naturales que se convierten en bloques de construcción del ADN del VIH; cuando la transcriptasa inversa trata de añadirlos a una hebra en desarrollo del ADN del virus, los fármacos impiden que se complete la hebra. En este grupo se encuentran el primer fármaco anti-VIH (la zidovudina [AZT], que se empezó a usar en 1987) y sus parientes químicos próximos. Los inhibidores no nucleósidos de la transcriptasa inversa, compuestos por otras clases de sustancias, constituyen la segunda clase de antirretrovíricos. Una tercera clase, los inhibidores de la proteasa, bloquean el sitio catalítico, activo, de la proteasa del VIH, impidiendo así que escinda las proteínas del VIH recién formadas.

Ya hace algún tiempo que se conocía el curso básico de la infección no tratada, pero las investigaciones recientes han añadido algunas piezas que faltaban. Son estos datos los que han convencido a los médicos de la necesidad urgente de interrumpir de la forma más completa posible la replicación vírica.

Hubo un tiempo en que las deficiencias técnicas hicieron pensar que el VIH infectaba en realidad pocas células *T* CD4 y que se replicaba de manera muy lenta durante mucho tiempo. Según este punto de vista, la razón de que disminuyesen las célu-



4. EL VIH RESISTE a los inhibidores de proteasa existentes, que se unen al sitio activo de la enzima proteasa, impidiendo su funcionamiento (*a*). El VIH puede eludir este efecto alterando partes de la enzima (*colores brillantes de b*), de modo que el fármaco no pueda fijarse de manera eficaz. Se estudia la formulación de un nuevo producto que tenga la suficiente flexibilidad para unirse (e inhibir) incluso a las formas alteradas de la proteasa del VIH (*azul claro en c*). Todos los dibujos son muy esquemáticos.

las *T* era un mecanismo distinto de la proliferación desbocada del VIH, lo que, a su vez, significaba que los fármacos capaces de bloquear la reproducción vírica podían no interferir mucho en la progresión de la enfermedad hasta poco antes de que comenzara el sida. Ahora está claro que el VIH se replica con profusión desde el principio. Los niveles de VIH se mantienen bastante estables durante varios años sólo porque el organismo responde durante un tiempo fabricando cantidades extraordinarias de células *T* CD4.

Se ha aprendido además que la fuerza de la respuesta inmune inicial (en el estadio agudo) de los pacientes no tratados ejerce una influencia decisiva sobre el ritmo de progresión hacia el sida. Los pacientes que presentan gran actividad de células *T* CD8 y que, por tanto, consiguen una mayor supresión de la replicación vírica y un punto de equilibrio vírico menor, avanzan más despacio hacia la enfermedad que quienes presentan una lucha más débil.

También parece que una fuerte actividad inmune durante la fase aguda de la infección ayuda a conservar la capacidad tardía del organismo para fabricar el subtipo de células *T* CD4 que reacciona específicamente contra el VIH. Una vez perdidas esas células, no pueden ser restituidas, aun cuando el tratamiento ulterior detenga la replicación vírica y dé al sistema inmunitario una oportunidad para apuntalar sus cifras generales de células *T* CD4.

Por último, en cualquier estadio de la infección hay una relación entre los niveles víricos y el pronóstico. En muchos trabajos en los que se ha estudiado específicamente la relación entre ambos aspectos se llega a la conclusión de que aquellos pacientes cuyas concentraciones víricas caen hasta valores indetectables y se mantienen así son los que tienen mayores probabilidades de evitar llegar a tener sida.

Estos datos indican en su conjunto que la cantidad de virus que se tenga influye de manera muy importante en la determinación del destino de un paciente. Esta es la razón de que la terapéutica tenga que proponerse como objetivo acabar con la reproducción vírica. Para la gran mayoría de los pacientes, cuyo sistema inmunológico no puede luchar adecuadamente contra el VIH sin ayuda, las mayores posibilidades de mantenerse bien durante un tiempo largo las ofrece una farmacoterapia decidida. Parece, sin embargo, que incluso quienes respondan bien a este tratamiento (que será en quienes se detenga la replicación) tendrán que seguir tomando las medicinas durante varios años y puede que de forma indefinida. La razón, como veremos, tiene que ver con la presencia en el organismo de refugios que protegen al VIH y que no son erradicados por el tratamiento antirretrovírico.

La teorías y los ensayos clínicos indican que la mejor forma de conseguir la supresión vírica máxima es el HAART, siglas correspondientes a la expresión "tratamiento antirretrovírico muy activo" en inglés. En la actualidad, el HAART suele consistir en una triple terapéutica, compuesta por dos análogos de nucleósido y un inhibidor de la proteasa (con un coste de entre 10.000 y 20.000 dólares al año en medicinas). Los lectores pueden consultar *Guidelines for the Use of Antiretroviral Agents in VIH-Infected Adults and Adolescents*

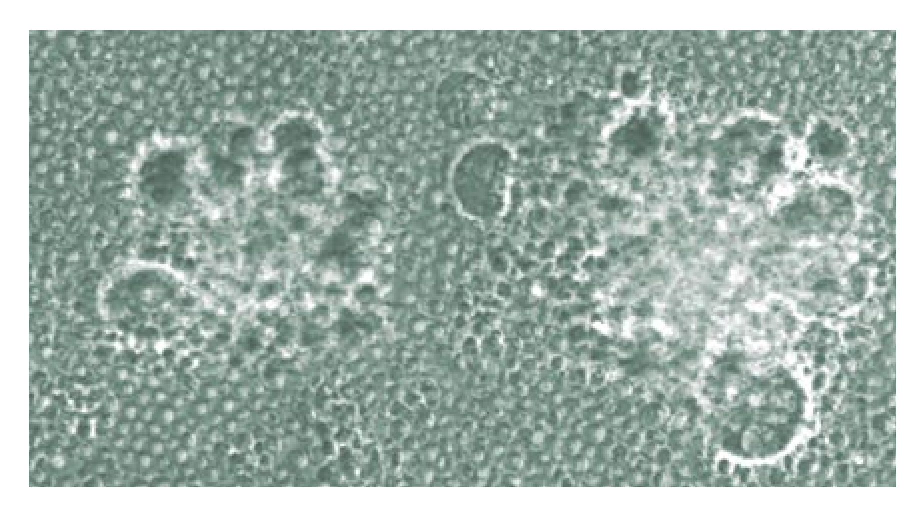
(Pautas para el uso de agentes antirretrovíricos en adultos y adolescentes infectados por el VIH), publicado por el Departamento de Salud y Servicios Humanos estadounidense, donde se contiene una lista actualizada de las combinaciones recomendadas (en Internet, véase http:// www.hivatis.org/trtgdlns.html).

El hecho de que los médicos prescriban más a menudo esta combinación deriva de que fue la primera que produjo una buena respuesta, pero se están evaluando otras clases de combinados farmacológicos que incorporan nuevos medicamentos y que puede que sean más potentes o más fáciles de utilizar. Uno de ellos utiliza dos inhibidores de la proteasa y otro una combinación de un inhibidor de la proteasa y un inhibidor no nucleósido de la transcriptasa inversa; estos dos tipos de medicamento son más potentes que la zidovudina y otros análogos de nucleósido. Se está analizando también la conveniencia de combinar cuatro agentes terapéuticos y más.

Los regímenes de múltiples fármacos tienen sentido por varias razones. Si uno de ellos no consigue bloquear la replicación vírica, toma las riendas el segundo. Y por si fracasan ambos ataques, el tercer principio proporciona una garantía adicional.

Como se explica en otra parte de este informe especial, el VIH se vuelve inevitablemente resistente, o insensible, a los retrovíricos que no consiguen suprimir por completo la replicación vírica. Dado que ninguno de los fármacos disponibles puede conseguir dicha supresión por sí solo, cualquier principio que se administre solo acabará por resultar inútil, a veces en un plazo de pocas semanas. Las cepas de VIH que se vuelven resistentes a un medicamento suelen resultar además insensibles a otros de la misma clase (fenómeno conocido como resistencia cruzada), lo que los anula como posibles alternativas. Al virus le tendría que costar mucho más volverse resistente al tratamiento si es atacado por una mezcla de sustancias que, juntas, lograsen acabar por completo con la replicación vírica.

Dado que hay una relación entre los niveles sanguíneos víricos, por un lado, y el tiempo que transcurra hasta la aparición del sida y el número de años de supervivencia, por otro, los médicos utilizan esos niveles como indicadores de la eficacia del tratamiento, de forma que puedan detectarse los fallos antes de que se produzca el fracaso inmunológico y mientras se esté a tiempo de adoptar medidas correctoras.



5. DOS GRUPOS de células *T* que se han unido y están muriendo porque el VIH antes quiescente en un refugio oculto (una sola célula *T* inactiva o en reposo) recibió el estímulo necesario para replicarse. Las partículas víricas liberadas se diseminan y destruyen las células sanas. Para curar la infección tendrá que encontrarse una forma de erradicar estos letales depósitos, que los fármacos actuales respetan.

Los niveles víricos se evalúan mediante ensayos de carga vírica, que permiten contar las copias de ARN del VIH que hay en un mililitro de plasma (la parte de la sangre que no tiene células); el número de partículas víricas es la mitad de las moléculas de ARN contadas. Las pruebas de que se dispone actualmente son sensibles a concentraciones de ARN de 500 o más copias por mililitro y se están desarrollando ya otras que respondan a tan sólo 50 copias por mililitro. En las ocho semanas posteriores al comienzo del tratamiento los niveles víricos deben disminuir por lo menos diez veces. A los seis meses deben ser indetectables y mantenerse así.

Los resultados obtenidos por el tratamiento triple en los ensayos clínicos han sido fenomenales. Por ejemplo, entre los pacientes con recuentos de células *T* CD4 comprendidos entre 200 y 500 células por milímetro cúbico y que no habían sido tratados previamente (y, por tanto, era improbable que albergaran virus resistentes), del 75 al 85 por ciento consiguió cargas víricas por debajo de 500 copias de ARN por mililitro en un período comprendido entre 24 y 100 semanas, mientras que entre el 60 y el 75 por ciento alcanzaban cargas víricas inferiores a 50 copias.

Los resultados en la "vida real" también han sido buenos, pero menos. Aproximadamente la mitad de los pacientes que recibieron triple farmacoterapia consiguieron alcanzar el objetivo de una carga vírica inferior a 500 copias por mililitro en un período comprendido entre seis y 52 semanas después de empezar el tratamiento, según datos casi idénticos procedentes de las clínicas del Hospital General de San Francisco y de las Instituciones Médicas Johns Hopkins.

Aunque los resultados "de campo" no sean comparables a los de los ensayos clínicos, éxitos del cincuenta por ciento son el doble de buenos que los conseguibles hace muy pocos años. Y ese imperfecto nivel de éxito ha bastado, según parece, para lentificar el progreso de la enfermedad en muchos casos. Desde que se introdujo este tratamiento, las clínicas de VIH del Hospital General de San Francisco y del Johns Hopkins han experimentado disminuciones de entre un 50 y un 80 por ciento de las hospitalizaciones por problemas relacionados con el VIH y reducciones de la incidencia de las principales enfermedades oportunistas relacionadas con el sida de entre un 50 y un 70 por cien.

No tiene que sorprender que estos resultados sean menos espectaculares, pues los pacientes atendidos en las clínicas son mucho más heterogéneos que los participantes en los ensayos. Muchos empiezan el tratamiento en una etapa relativamente tardía de la infección, cuando puede que su carga vírica sea ya demasiado grande para poder vencerla con los medios disponibles y cuando quizá tampoco pueda

recuperarse su sistema inmunológico. La mayoría de los pacientes clínicos han tenido además una exposición previa a fármacos antirretrovíricos y, por tanto, es probable que alberguen virus resistentes a uno o a varios principios del tratamiento.

El tratamiento tiene además muchos inconvenientes, que dificultan su cumplimiento por parte de los pacientes que no estén muy comprometidos y sean muy organizados. Tienen que tragarse cada día al menos ocho, y a menudo 16 o más, pastillas contra el VIH (junto con otras medicinas necesarias, como las pensadas para prevenir las infecciones oportunistas específicas o para controlar el dolor). Tienen que recordar cuál tiene que tomarse con la comida, cuál con el estómago vacío y cuáles no pueden tomarse juntas o con otra clase de medicamentos. Incluso las personas más ordenadas pueden confundirse u olvidar las dosis; algunos de estos pacientes no tienen hogar, están demenciados, son adictos a las drogas o carecen de los apoyos que les ayudarían a seguir estrictamente un régimen de medicación.

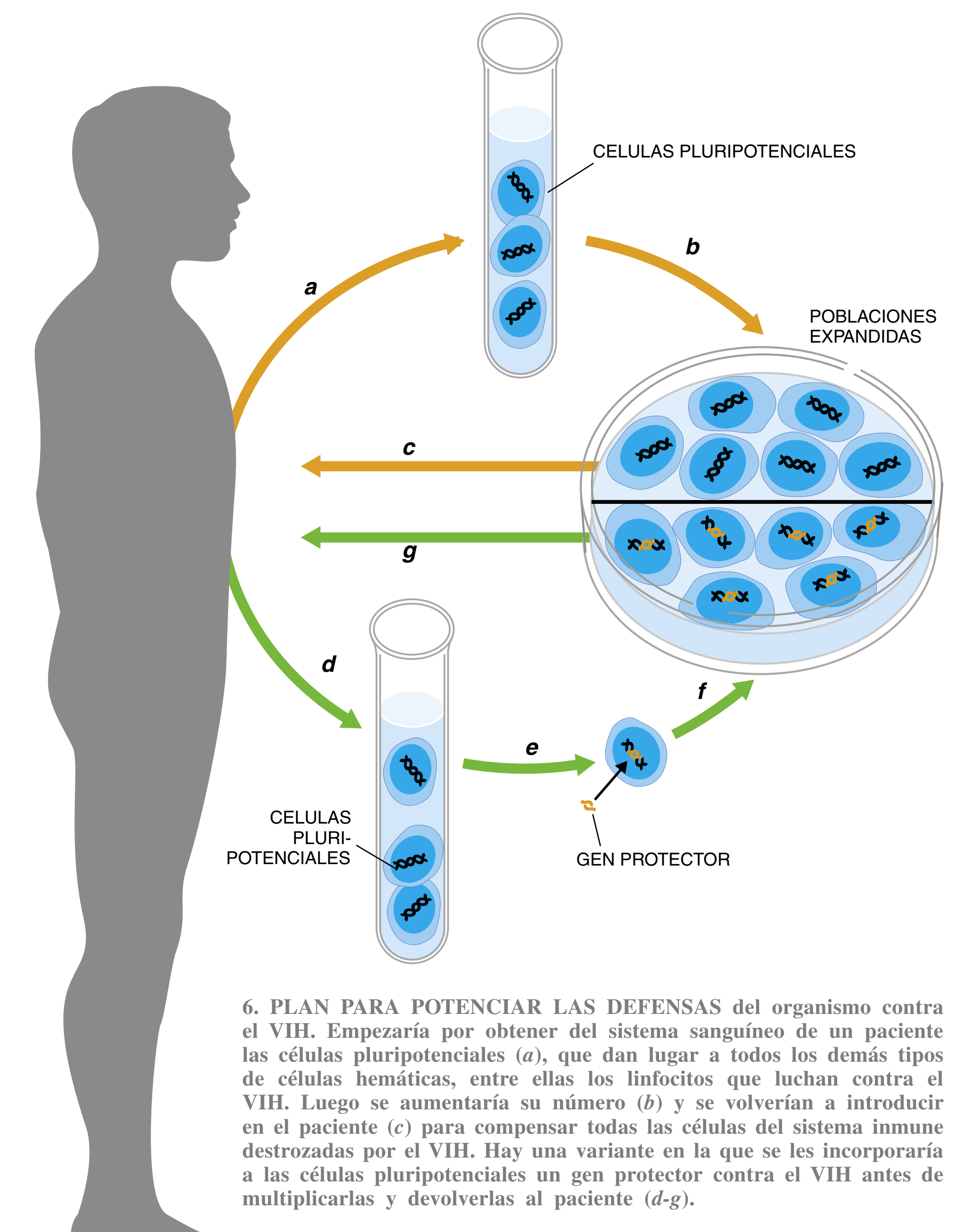
La probabilidad de que los pacientes que carecen del apoyo y el aliento proporcionados en los ensayos clínicos se salten las dosis y de que abandonen el tratamiento cuando encuentren efectos colaterales desagradables también es mayor. Los efectos no deseados de los antirretrovíricos pueden ir del exantema, las náuseas, la diarrea y la cefalea, por un lado, hasta la anemia, la neuropatía (pie doloroso o entumecido), la hepatitis y quizá la diabetes, por otro. Algunas de estas consecuencias resultan peligrosas e intolerables para cualquiera, si son lo bastante intensas, pero otras son soportables.

Cualesquiera que sean las razones para no tomar las dosis, las consecuencias más probables son una supresión incompleta de la replicación vírica y la aparición de resistencia. El tratamiento tiene fama de ser implacable con quienes no lo siguen. Una vez establecida la resistencia ya no se puede "volver a empezar" con el mismo plan, porque no funcionará. El seguimiento incompleto del plan de tratamiento explica por desgracia alrededor de la mitad de sus fracasos, aunque nadie pueda determinar cuál sea el número mínimo de pastillas cuya no ingestión provoque la resistencia.

Hemos de indicar también que hay algunos pacientes, que, en apariencia, siguen estrictamente el tratamiento, pero no consiguen alcanzar niveles indetectables del virus o mantenerlos. Este fracaso virológico pudiera deberse a que la combinación farmacológica prescrita no fuese lo bastante potente como para interrumpir por completo la replicación del virus en esos individuos. Es posible que sus organismos, por la razón que sea, descompongan los medicamentos con demasiada rapidez o que impidan su diseminación completa, con lo cual muy poca medicación alcanzaría las células infectadas. Cuando los valores de carga vírica sean inferiores a 500 copias por mililitro, en el caso de determinadas personas esto significará la ausencia total de replicación vírica, pero en el de otras seguirá habiendo un cierto grado de actividad, pequeño, pero suficiente para permitir la aparición de resistencia.

La experiencia obtenida respecto del tratamiento en los últimos años ha sido instructiva, pero no ha resuelto algunas dudas, entre las que se encuentra la de si todos los pacientes deberían ser tratados en cuanto se les diagnostica.

Los especialistas están de acuerdo en que el momento ideal para iniciar el tratamiento es durante la fase aguda, cuando las posibilidades de que los pacientes conserven sus defensas inmunológicas son máximas, pero pocos de ellos son diagnosticados en esa etapa. En el otro extremo, las personas que ya tengan síntomas o



6. PLAN PARA POTENCIAR LAS DEFENSAS del organismo contra el VIH. Empezaría por obtener del sistema sanguíneo de un paciente las células pluripotenciales (*a*), que dan lugar a todos los demás tipos de células hemáticas, entre ellas los linfocitos que luchan contra el VIH. Luego se aumentaría su número (*b*) y se volverían a introducir en el paciente (*c*) para compensar todas las células del sistema inmune destrozadas por el VIH. Hay una variante en la que se les incorporaría a las células pluripotenciales un gen protector contra el VIH antes de multiplicarlas y devolverlas al paciente (*d-g*).

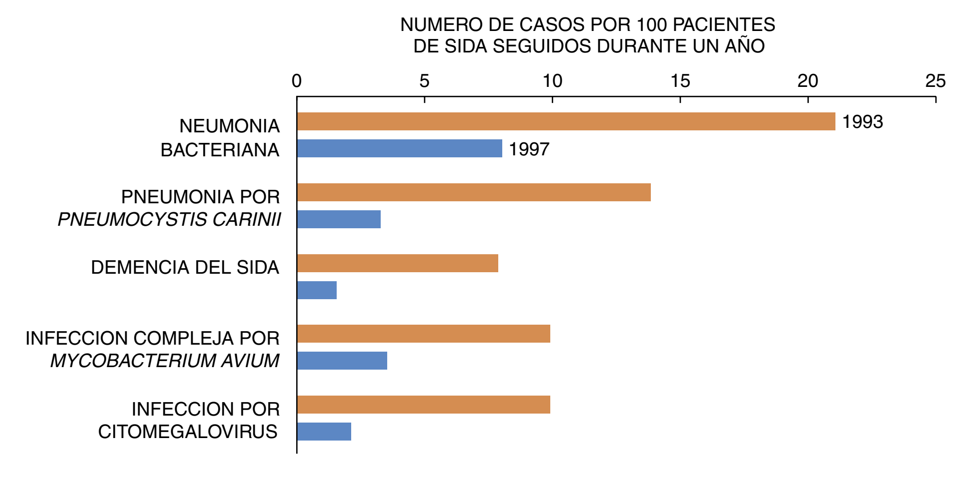
cuyo recuento de células *T* CD4 sea inferior a 200 por milímetro cúbico también necesitan tratamiento, pues no vivirían mucho sin él.

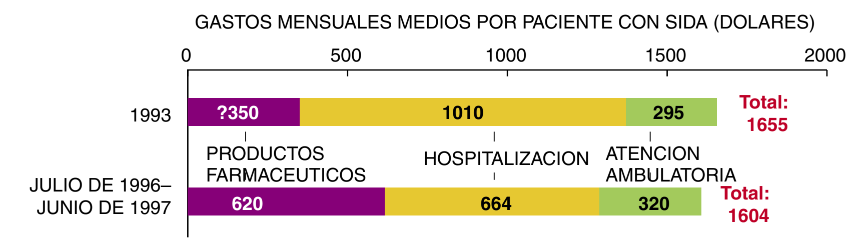
Pero quienes se ocupan de atender a los enfermos VIH positivos son partidarios de ofrecerlo también a un tercer grupo, el de las personas asintomáticas cuyo recuento de células *T* CD4 esté comprendido entre 200 y 500 células por milímetro cúbico o cuya medida de carga vírica sea superior a unas 10.000 o 20.000 copias de ARN por milímetro. Estos pacientes tienen al menos un 8 por ciento de probabilidad de adquirir una infección oportunista definidora del sida en un plazo de tres años y un 25 por ciento de ser sidosos declarados en seis años, si no reciben tratamiento.

Los umbrales de células *T* y de carga vírica son bastante arbitrarios, sin embargo. Puesto que estos pacientes se sienten perfectamente bien, puede que algunos sean bastante reacios a embarcarse en un plan de tratamiento tan exigente, con los efectos secundarios que acarrea y su constante recordatorio de la enfermedad. Si apareciese resistencia y el tratamiento fracasase, las alternativas futuras disponibles serían además muy escasas. Por estas razones habrá quien opte por retrasar la terapéutica hasta que los análisis muestren signos de progresión, hasta que se disponga de regímenes simplificados o haya nuevos fármacos con menos efectos secundarios. La mayoría de los pacientes cuyos recuentos de células *T* CD4 sean de más de 500 y cuyas cargas víricas estén por debajo de 10.000 a 20.000 también decidirá esperar.

Cuando el tratamiento no consigue reprimir la replicación vírica detectable, se plantea la cuestión de qué hacer en tales circunstancias. Por desgracia no hay métodos de emergencia que logren el éxito que tiene HAART cuando constituye el primer tratamiento. Lo que suelen hacer los médicos es ayudar a que los pacientes superen los obstáculos que impidieron seguir el régimen inicial, cambiando completamente los medicamentos y teniendo cuidado de evitar aquellos que tengan probabilidades de encontrar resistencia.

La práctica ofrece también algunos consejos juiciosos sobre qué hacer cuando no se logra interrumpir la replicación vírica de ninguna manera. Nada bueno puede lograr la continuación del tratamiento antirretrovírico si el sistema inmune ya está destrozado. De no ser así, puede que la continuación del régimen merezca la pena. Las observaciones hechas en los hospitales mencionados indican que no es lo mismo el fracaso virológico (la suspensión vírica incompleta) que el fracaso clínico (la aparición de complicaciones relacionadas con el VIH). Algunas investigaciones han demostrado que incluso cuando se esté produciendo una elevación de los niveles víricos, hay casos en que la terapia de combinación puede restringir algo la replicación del VIH, lo que podría ayudar a mantener o elevar los niveles de células *T* CD4 y, por tanto, permitiría ganar un tiempo precioso para el paciente.





7. EL VALOR DEL TRATAMIENTO SIN CUARTEL contra el VIH, que empezó a utilizarse de forma generalizada en 1996, queda reflejado en la disminución de las frecuencias de varias infecciones oportunistas sufridas por los sidosos de la clínica del VIH de la Universidad Johns Hopkins (*arriba*). Aunque los costes totales por paciente no disminuyeron mucho (*abajo*), hubo que gastar menos dinero en atención hospitalaria, lo que es un signo adicional de que los pacientes estaban más sanos.

Incluso quienes responden muy bien desde el principio plantean enigmas a los investigadores. No se tiene todavía la seguridad de que un tratamiento aparentemente satisfactorio reconstituya por completo el sistema inmune. Lo normal hasta ahora parece ser la restauración parcial; el tratamiento eleva los niveles de células *T* CD4 en una media de 100 a 200 células por milímetro cúbico. También puede ocurrir que siga siendo anómala la mezcla de subtipos de células *T* CD4, es decir, que las nuevas células no reconozcan tantos patógenos como las originarias y combatan las infecciones con menos eficacia.

Por lo que respecta al futuro, todos confiamos en que los tratamientos que han tenido éxito inicial sigan funcionando en los años siguientes. Si se ha detenido por completo la replicación de VIH, el tratamiento parece haber evitado la aparición de resistencia y, por tanto, debería seguir funcionando de forma indefinida. Pero queda por ver si los hechos confirmarán la teoría.

Las investigaciones sobre la posibilidad de que las combinaciones farmacológicas actuales puedan curar la infección de VIH son menos alentadoras. El VIH puede sobrevivir aparentemente en un estado latente en las células *T* CD4 en reposo (las que no se están dividiendo), como un provirus integrado que produce pocas partículas víricas, si es que produce alguna. Estas células pueden volver a producir en serie nuevas partículas si algo hace que se activen de nuevo. Cuando se empezó a utilizar el HAART, hubo quien expresó su esperanza de que las células *T* en reposo morirían rápidamente por sí

mismas, eliminando con ello la amenaza perpetua de un resurgimiento del VIH. Pero hay indicios más recientes de que algunas de ellas pueden persistir y seguir siendo una amenaza durante años.

No resulta sorprendente que se estén investigando formas de incitar al sistema inmune a que elimine tales guaridas. Para que pueda destruirlas, el sistema inmunitario tiene que "verlas". Cuando una célula es infectada por un virus suele exhibir fragmentos del microorganismo, o antígenos, en su superficie, tras de lo cual las células *T* que los reconocen orquestan un ataque. Pero las células que transportan un provirus quiescente en su ADN no despliegan antígenos del VIH.

Una forma de vencer este problema sería la administración de sustancias que activasen a propósito las células en reposo, induciéndolas a fabricar partículas del VIH, con lo que se desplegarían los antígenos y se desencadenaría la respuesta inmunitaria asesina. El tratamiento con HAART, mientras tanto, evitaría que el virus colonizara otras células. El riesgo que se corre es, obviamente, que no se consiga el resultado previsto y el virus se alce con la victoria. Aun cuando el plan funcionara, pudiera haber otros refugios que el VIH podría utilizar durante toda la vida, como serían las neuronas cerebrales. Los leucocitos sanguíneos conocidos como macrófagos también podrían servir como escondrijos, pero su vida es relativamente corta.

Como parece improbable que los tratamientos actuales consigan en los próximos años la curación de la infección y dados sus diversos inconvenientes (efectos secundarios, regímenes complicados y resistencia), se están investigando nuevos fármacos. Los primeros que se comercializarán serán los que añadan nuevas variantes a las clases actuales, puede que combinándolos en una pastilla única o reduciendo de algún otro modo la complejidad y la toxicidad de los regímenes actuales. Hay al menos dos inhibidores de la proteasa específicamente proyectados que parecen estar funcionando en los ensayos clínicos contra las cepas del VIH que son resistentes a los inhibidores de proteasa existentes.

Otros medicamentos en estudio tratan de detener por medios nuevos la replicación del VIH. Algunos bloquearían la integrasa, impidiendo la inserción del ADN del VIH en los cromosomas de la célula. Otro consistiría en eliminar el cinc de las proteínas que lo necesiten para introducir el ARN del VIH en nuevas partículas.

Se están estudiando también formas de evitar que las células infectadas fabriquen las proteínas víricas fundamentales. Una posibilidad consistiría en desplegar el denominado ADN antisentido para inactivar dos genes (*tat* y *rev*) que suelen producir las proteínas necesarias para la fabricación eficaz de otras proteínas víricas. Esta terapéutica limitó la replicación vírica y el agotamiento de las células *T* CD4 de monos rhesus expuestos a la versión simia del VIH.

Son muchos los investigadores que están intentando impedir la entrada del VIH a las células. Recordemos que, para unirse a una célula blanco y conseguir entrar en ella, el virus tiene que fijarse al CD4 y a un correceptor sobre la superficie celular. Los intentos iniciales de interferir en la unión con el CD4 fueron desalentadores, pero se han abierto recientemente nuevas posibilidades y muchos grupos están examinando compuestos que podrían bloquear el sitio de acoplamiento del VIH en los correceptores para mantener el VIH a raya [*véase* "Genes que oponen resistencia al sida", de Stephen J. O'Brien y Michael Dean; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre, 1997].

Hay quien se centra en el otro miembro de la ecuación, en el sistema inmune, e intenta aumentar las fuerzas restantes del organismo o restaurar las potencialidades perdidas. Por ejemplo, algunos pacientes están recibiendo dosis bajas de una molécula biológica, la interleucina 2, que potencia la proliferación de los linfocitos *T*. Se espera también que la interleucina 2 pueda contribuir a que las "células pluripotenciales" inmaduras se multipliquen y produzcan un repertorio completo de células inmunitarias nuevas, entre ellas los linfocitos *T* y las células productoras de anticuerpos que puedan reconocer y eliminar el VIH.

Los esfuerzos de reconstitución del sistema inmune adoptan además otras formas (como la recolección de células pluripotenciales de un paciente infectado por el VIH, su multiplicación en el laboratorio y la reimplantación ulterior de la población celular aumentada). Un paso más de este plan sería introducir en las células reimplantadas un gen que las protegiera de sucumbir después al VIH.

Otro de los planteamientos que se están considerando es el de matar a las células infectadas por el VIH sin contar con el sistema inmunitario. Se introduciría un virus que hubiera sido alterado genéticamente para que no entrara más que en las células productoras de VIH, sin tocar a las no infectadas. El nuevo virus se introduciría mediante su unión a las proteínas víricas exhibidas por la célula colonizada y luego la destruiría.

Los pacientes infectados por VIH pueden estar seguros de que cada vez tendrán más opciones de tratamiento conforme pase el tiempo. Puede que cambien los detalles, pero se mantendrán los principios terapéuticos, fundados ahora en una investigación sólida. Mientras no haya un tratamiento que cure o una vacuna, el control de la replicación del VIH ofrece las mejores perspectivas de prolongación de una vida útil.

Es sorprendente y maravilloso que sepamos tal cosa y que dispongamos de los medios para impedir la reproducción del VIH. El avance terapéutico conseguido desde finales de 1995 tiene pocos parangones en la historia de la medicina, salvo quizá la revolución desatada por la introducción de la penicilina. Hace exactamente tres años la mayor parte del tiempo y de las energías de quienes nos dedicábamos a la atención de pacientes con VIH se destinaba a aliviar los síntomas y a prepararles para morir. Ahora les ayudamos a vivir. La guerra contra el VIH está lejos de haber terminado, pero el éxito del tratamiento sin cuartel es, desde luego, una victoria que podemos saborear.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

Directrices sobre tratamientos para adultos, adolescentes y niños, así como para evitar la transmisión madre-hijo pueden solicitarse al HIV/AIDS Treatment Information Service (800-458.52.31) y a través de Internet: http://www.hivatis.org /trtgdlns. html o: http://www.cdcnac. org.

PLASMA VIRAL LOAD AND CD4+ LYMPHOCITES AS PROGNOSTIC MARKERS OF HIV-1 INFECTION. J. W. Mellors y otros, en *Annals of Internal Medicine*, vol. 126, n.º 12, páginas 946-954; 1997.

ANTIRETROVIRAL DRUG RESISTANCE. Dirigido por Douglas D. Richman. John Wiley & Sons, 1996.

Resistencia a los medicamentos

Douglas D. Richman

Cuando los tratamientos contra el VIH no aciertan a mantener reprimidos los niveles de VIH, la causa suele ser la resistencia de los virus a uno o más de los medicamentos que se están administrando. ¿Cómo se desarrolla esa insensibilidad?

En su raíz, la resistencia está mediada por mutaciones en los genes víricos. El genoma (conjunto completo de genes) de cualquier partícula de VIH actúa como molde para las enzimas y el resto de las proteínas necesarias para hacer nuevas copias del virus. Los medicamentos actuales contra el VIH, llamados antirretrovíricos, se unen a enzimas específicas del virus e impiden su actividad. Las mutaciones genéticas pueden modificarlas de forma que se dificulte la unión o quede socavado de alguna otra manera el ataque del fármaco. Basta una única mutación para inutilizar a algunas medicinas, entre las que se cuentan los inhibidores no-nucleosídicos de la transcriptasa inversa, mientras que otras requieren múltiples mutaciones del mismo genoma, como los inhibidores de proteasas.

El uso de un antirretrovírico puede de hecho promover la proliferación de variantes de VIH resistentes a los fármacos. La razón tiene que ver con la rápida y relativamente arbitraria replicación del virus. Si se le deja a su aire, el VIH crea aproximadamente diez mil millones de nuevas partículas víricas al día en un individuo infectado, aunque lo haga sin prestar mucha atención a la precisión. Es muy probable, pues, que el genoma de cada nueva partícula difiera del "paterno" por lo menos en algún punto. Esta inexactitud, unida a la prolífica tasa de reproducción del VIH, significa que es probable que diariamente se generen en una u otra partícula vírica todas las mutaciones capaces de producir la resistencia o de contribuir a ella. En otras palabras, aunque un paciente nunca haya sido tratado, cualquier producto que se le administre se encontrará con alguna forma de VIH que ya sea resistente a él o que esté en vías de acumular el conjunto completo de mutaciones necesarias para serlo.

Consideremos ahora lo que sucede cuando un paciente toma un antirretrovírico. Supongamos a efectos de nuestra argumentación que la desactivación de esta medicina requiera cinco mutaciones del genoma. El fármaco detendrá la reproducción de las variantes que todavía sean sensibles a él, pero las subpoblaciones de VIH que de alguna manera no lo sean continuarán proliferando hasta determinado punto. Antes de la terapia, la mayoría de las variantes no llevará más de dos mutaciones de resistencia; con el tiempo la replicación en curso permitirá que al menos algunas de las cepas semirresistentes adquieran otra mutación de resistencia adicional. Si se sigue administrando el medicamento, estas formas de VIH dejarán atrás a sus parientes más susceptibles y tendrán la oportunidad de adquirir el resto de las alteraciones genéticas necesarias. Llegadas a este punto, eludirán al antirretrovírico completamente y crecerán sin trabas.

Dicho de otro modo, el uso de un agente anti-VIH "seleccionará" el desarrollo y el crecimiento de cepas resistentes, a menos que sea capaz de detener todo tipo de proliferación vírica. Si cuando se suministra un fármaco por primera vez ya está presente un virus resistente, el producto permitirá que dicha población crezca, llevando a su rápido fracaso.

El hecho de que la resistencia se produzca tan fácilmente, unido al de que ningún producto farmacéutico del mercado sea lo suficientemente potente para reprimir por sí solo al VIH, hace que ya no se trate a los pacientes con un solo fármaco (monoterapia). Los médicos suelen elegir combinaciones que refuercen la potencia y reduzcan las probabilidades de resistencia. Así, por ejemplo, se procura evitar los fármacos anti-VIH que el paciente haya tomado con antelación, suponiendo que su utilización pasada habrá originado la presencia de poblaciones insensibles.

Una vez seleccionada una terapia, se tiene que prestar atención a los signos de aparición de resistencia. Si el virus es detectable en la sangre después de entre cuatro y seis meses de tratamiento, ya sea por la inadecuada potencia del fármaco, su insuficiente absorción o la falta de rigor en su aplicación, su presencia alerta de que se está produciendo la replicación y de que se ha desarrollado resistencia o se está en vías de que aparezca.



UN UNICO FARMACO "SELECCIONA" el crecimiento de virus resistentes. En un paciente coexisten muchas variantes de VIH en ausencia de medicación (*izquierda*). La administración de un producto que impida la replicación producirá su efecto en las variantes susceptibles (*arriba*), pero será ignorado en gran medida por las resistentes (*abajo*), que continuarán multiplicándose.

El sida infantil

Catherine M. Wilfert y Ross E. McKinney, Jr.

La infección del VIH es especialmente difícil de combatir en los más jóvenes

Los niños infectados de VIH tienen más dificultades que los adultos para mantenerse bien, pues el virus tiende a ser más agresivo en los pequeños, llevando con más rapidez a la disfunción inmunitaria que es el sida y a la muerte. No se dispone de muchos fármacos anti-VIH para niños (de edades inferiores a los 13 años) y los pediatras no cuentan con suficientes datos de casos infantiles en que basarse para trazar planes de tratamiento. Es posible, por otro lado, que los métodos terapéuticos más recomendables desde un punto de vista médico no sean fáciles de aplicar en un entorno familiar.

Los niños infectados de VIH casi siempre han recibido el virus de sus madres, durante la gestación o la lactancia. Unos dos tercios lo adquieren en la sala de partos o en los días previos al nacimiento. Actualmente hay en el mundo más de un millón de niños infectados y cada día vienen a sumárseles alrededor de 1500, padeciéndose sobre todo esta desgracia en los países en vías de desarrollo.

La virulencia del VIH en los niños se hace muy pronto evidente, soliéndose manifestar los síntomas de la infección ya durante el primer año de vida, es decir, con mucha más rapidez que en los adultos, que de ordinario se sienten bien durante varios años. Gran parte de los infectados —hasta un 16 %— mueren antes de cumplir cuatro años por la rápida destrucción de su sistema inmune y por desarrollarse en ellos muchas de las infecciones que pueden terminar afectando también a los mayores, aunque muy pocos adultos sucumban tan rápidamente a ellas.

Aparte de enfermar más rápidamente, los niños pueden manifestar también efectos no observados en pacientes de más edad. Apenas iniciado el curso de la enfermedad, el VIH puede invadir el cerebro infantil, órgano que se está configurando, por lo que la invasión vírica puede obstaculizar el desarrollo de la inteligencia y deteriorar las funciones motoras, dando origen a problemas de coordinación, normalmente de carácter permanente. Los adultos pueden sufrir también alguna disfunción cerebral, pero de forma bastante tardía.



MEDICAMENTO ANTI-VIH administrado a un niño por vía oral mediante una jeringuilla sin aguja. No se dispone de muchas píldoras infantiles, ya que es preferible la administración en forma líquida, pero algunos componentes de los medicamentos anti-VIH tienen un sabor nauseabundo o son difíciles de preparar en forma de jarabes.

También puede retardarse el desarrollo físico (en altura y en peso), aun en ausencia de otros síntomas. El tratamiento antivírico eficaz restaura el proceso normal de desarrollo, lo que permite servirse de los cambios de estatura y de peso como indicadores indirectos de los resultados terapéuticos.

Los niños contraen siempre más infecciones bacterianas que los adultos, por el simple hecho de que no han tenido los años de exposición necesarios para que se constituya la inmunidad. Cuando el sistema inmunitario resulta debilitado por el VIH, aumenta la vulnerabilidad. La consecuencia es que alrededor de un 20 % de las víctimas infantiles del sida sufren infecciones bacterianas graves y recurrentes, como la meningitis o la neumonía. Algunos padecen repetidos ataques de infecciones víricas, por ejemplo de varicela, que raramente se repite en los demás niños.

Los especialistas tienen ya cierta idea de por qué el VIH actúa con mayor rapidez entre los niños, a saber, las grandes cantidades de virus que suelen tener en la sangre, cantidades parecidas a las de los adultos en los momentos iniciales de la infección. Lo que sucede es que los niveles de los adultos disminuyen tras algunos meses, mientras que los de los niños se mantienen elevados durante años. Esas cargas víricas tan grandes y persistentes son más difíciles de combatir, a lo que se deben la rapidez del progreso de la enfermedad y el acortamiento de la vida.

Dilemas sobre el tratamiento

Aparte de las dificultades que implica tratar a cualquier enfermo con grandes cantidades de VIH, hay otras razones que complican el caso de los niños. La lógica hace pensar que los tratamientos que dan resultados óptimos con los adultos tendrían que funcionar igualmente bien con los niños, es decir, a ambos deben proporcionárseles tres o cuatro medicamentos simultáneamente, al menos uno de los cuales será un inhibidor de proteasas. Pero es difícil llevar a la práctica semejante ideal.

Parte del problema consiste en que hasta en los países industrializados, donde se cuenta con amplios sistemas

sanitarios y con abundantes recursos médicos, se dispone de menos medicamentos para los niños que para los adultos. Como muchos niños son incapaces de tragar píldoras, necesitan a menudo líquidos o jarabes, pero ciertos componentes anti-VIH son insolubles en el agua o tienen un sabor nauseabundo.

Añádase que, históricamente, las empresas farmacéuticas no probaban sus medicamentos en los niños hasta después de haberse asegurado de su eficacia en los adultos. Y junto a las dilaciones respecto a la aprobación de los fármacos, la escasez de estudios sobre sus efectos infantiles hacía que los pediatras recurriesen a tanteos y conjeturas para recetar dosis que había que calibrar según la edad y la estatura del pequeño. Afortunadamente las cosas están cambiando. Ahora se prueban con más rapidez los nuevos fármacos anti-VIH en los niños y se están haciendo por fin estudios sobre tratamientos combinados intensos como los de los adultos.

Aunque se resolviesen todos estos problemas, este tipo de regímenes siguen siendo muy gravosos, pues hay que administrar de tres medicinas para arriba dos o tres veces al día, todos los días, los 365 días del año. Y no se han de omitir ni equivocar las dosis, so pena de que el VIH se haga resistente a la medicación.

Cualquiera que haya tenido que tratar una simple otitis de un niño sano sabe lo fácil que es olvidarse de una dosis. Las familias de los niños VIH positivos no suelen estar desgraciadamente en muy buenas condiciones para cumplir los estrictos requisitos de un tratamiento tan exigente, por razones de pobreza, desaliño o enfermedad de la misma madre. El personal sanitario que trate a estos niños tiene que considerar si la familia será capaz de cumplir con las exigencias del tratamiento combinado o si sería preferible utilizar otra medicación menos ambiciosa.

Y acaba de surgir otra nueva dificultad terapéutica. Hasta ahora pasaban semanas o meses desde el nacimiento antes de que se les aplicase tratamiento a los niños. Pero recientes comprobaciones en los adultos indican que el pronto comienzo de la terapia combinada tras el diagnóstico es lo mejor que puede hacerse para limitar la multiplicación del virus y para asegurar la inmunidad. Esta conclusión no es en sí misma problemática. Mas de la investigación se deduce también que el iniciar una fuerte terapia inmediatamente después del nacimiento –que es cuando suele contraerse el VIH— pudiera evitar la infección o retrasar bastante su progreso hacia el sida en los bebés infectados. Por desgracia, en muchos casos a los médicos les es imposible confirmar la infección hasta unas dos semanas después del parto, que es cuando alcanza el virus niveles detectables en la sangre. A fin de proteger mejor a los bebés afectados, tendría que prescribirse una terapia intensiva para todos los neonatos hijos de mujeres con VIH positivo, incluso para la mayoría de los que normalmente se libran de la infección. Ante los inconvenientes que tiene un tratamiento anti-VIH intenso —su complejidad, toxicidad y grandes costes—, se comprende que muchos médicos se resistan a seguir tal vía.

Prevención

Como siempre, la prevención es la mejor medicina. La forma en que los países industrializados tratan de impedir actualmente la transmisión (vertical) del virus de la madre al hijo tuvo su origen en un experimento clínico franco-estadounidense llamado 'Grupo Protocolo 076 de Pruebas Clínicas sobre el sida infantil', estudio decisivo realizado en 1994. Las mujeres infectadas que participaron en él tomaron oralmente zidovudina (AZT) ya desde la decimocuarta semana de embarazo. Durante el parto se les suministró el producto por vía intravenosa. A los recién nacidos se les empezó a tratar inmediatamente con zidovudina y se les siguió administrando durante seis semanas. Pues bien, mientras el 26 % de los bebés nacidos de madres no medicadas adquirieron la infección del VIH, sólo lo hizo el 8 % de los del grupo tratado. Y ni las madres ni sus hijos mostraron ningún efecto perjudicial.

La aplicación generalizada del protocolo 076 ha reducido mucho la transmisión del virus de madre a hijo en los EE.UU. y en varias partes de Europa desde entonces. Hay especialistas que recomiendan que, para proteger a madres e hijos, debería ofrecerse el tratamiento combinado a las mujeres embarazadas, a las que se debería informar de las lagunas existentes en cuanto a seguridad, toxicidad y eficacia.

No se sabe exactamente por qué la zidovudina bloquea la transmisión vertical, ya que, suministrada sola, no suele reducir mucho la concentración del virus. Las mujeres con menores cargas víricas tienen menor probabilidad de transmitir el virus a sus hijos, pero ni siquiera tal reducción se debería fundamentalmente al medicamento. Quizá su principal efecto consista en impedir la infección durante el parto, cuando las secreciones maternas cargadas de virus pueden infectar las superficies mucosas de los ojos, la boca y el tracto gastrointestinal de los niños e introducirse en su torrente sanguíneo.

El panorama de los países en vías de desarrollo es bastante más negro. Las mujeres que viven en ellos no cuentan con asistencia prenatal o ésta tiene carácter muy limitado, de modo que el costoso protocolo 076 resulta allí impracticable. Es, por tanto, esencial una intervención más sencilla, que consiste idealmente en suministrar una sola dosis del medicamento a la madre parturienta y, a ser posible, otra a su vástago. Si el tratamiento fuese lo bastante barato, podría aplicarse sin previa prueba de VIH, lo cual tiene su importancia, pues en muchas partes el análisis es demasiado caro o conlleva alguna estigmatización. (La mujer infectada con VIH, si se revela que lo está, puede verse condenada al aislamiento o abandonada por su marido, aun cuando sea él la fuente de la infección.)

Se están haciendo varios estudios para evaluar los nuevos enfoques preventivos en países en vías de desarrollo. Algunos consisten en tratamientos más breves con zidovudina, mientras que otros utilizan medicamentos diferentes.

A comienzos de este mismo año se ha visto en una de esas pruebas, realizada en Tailandia, que la administración oral de zidovudina durante un promedio de 25 días, al final del embarazo, en el parto y en el postparto, puede reducir hasta la mitad la tasa de transmisión. Es una lástima que tanto el tratamiento breve de zidovudina como la prueba del VIH que le ha de preceder estén aún fuera del alcance de mucha gente.

CATHERINE M. WILFERT y ROSS E. McKINNEY, Jr., trabajan en el Medical Center de la Universidad de Duke, donde Wilfert es profesora emérita de pediatría y microbiología y directora de la Fundación para el Sida Pediátrico, mientras que McKinney dirige la División Pediátrica de Enfermedades Infecciosas y es profesor asociado.

Vacunas contra el VIH: dificultades y perspectivas

David Baltimore y Carole Heilman

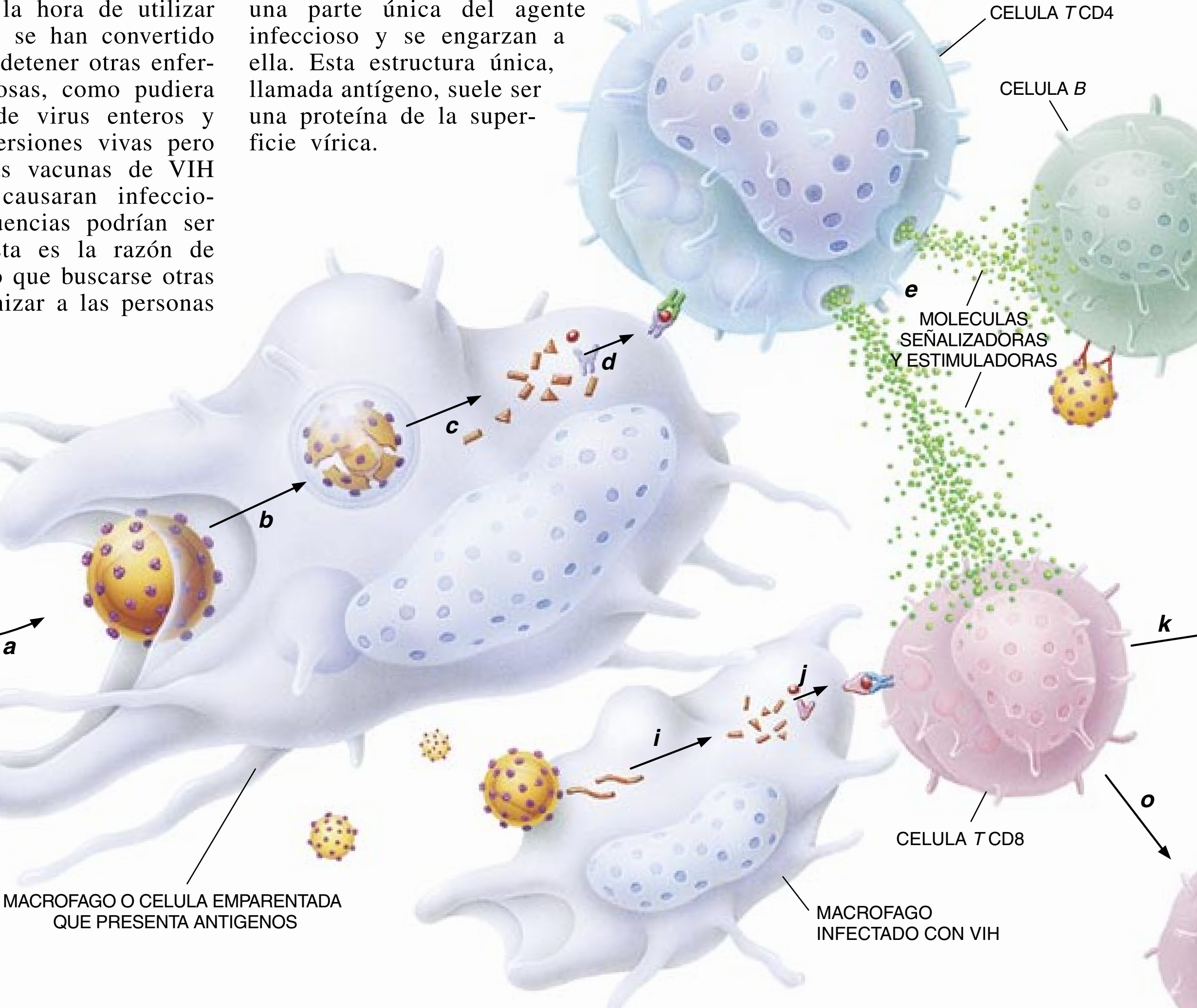
Se saben más cosas del VIH (el virus de la inmunodeficiencia humana que causa el sida) que de ningún otro virus. Pero la formulación de una vacuna que pueda protegernos de él es una tarea casi tan imponente ahora como cuando se descubrió el virus. Parte del problema reside en que, a diferencia de la respuesta somática a las infecciones víricas más agudas, la respuesta inmune natural no es capaz de destruirlo. Este fracaso hace que a los investigadores les resulte difícil saber qué tipo de actividad inmune es la que debería evocar una vacuna eficaz.

También hay que ser extremadamente cautos a la hora de utilizar los métodos que se han convertido en clásicos para detener otras enfermedades infecciosas, como pudiera ser el empleo de virus enteros y muertos o de versiones vivas pero atenuadas. Si las vacunas de VIH así preparadas causaran infecciones, las consecuencias podrían ser devastadoras. Esta es la razón de que hayan tenido que buscarse otras formas de inmunizar a las personas frente al VIH.

La forma de proteger que tienen las vacunas es cebar el sistema inmune del individuo para que reconozca a los organismos causantes de las enfermedades cuando se topa con ellos. Una vacuna eficaz contra VIH tendría que ser capaz de eliminar a los virus que penetraran en el organismo y de destruir rápidamente cualquier célula que resultara infectada.

La mayoría de las vacunas activan lo que se llama el brazo humoral del sistema inmune, estimulando la formación de anticuerpos protectores, moléculas que marcan a los virus libres (los que circulan por fuera de las células) para que sean destruidos. Los anticuerpos reconocen una parte única del agente infeccioso y se engarzan a ella. Esta estructura única, llamada antígeno, suele ser una proteína de la superficie vírica.

Los antígenos extraños presentes en los virus invasores o en las vacunas activan los glóbulos blancos de la sangre, que participan en la fabricación de anticuerpos y son de dos tipos. Tan pronto como entran en contacto con los antígenos, las células denominadas linfocitos *B* maduran y producen anticuerpos. Los linfocitos *T*, auxiliares o CD4, por su parte, inducen a las células *B* a que fabriquen más anticuerpos, en unos casos, o a que tomen la forma de células *B* de memoria,

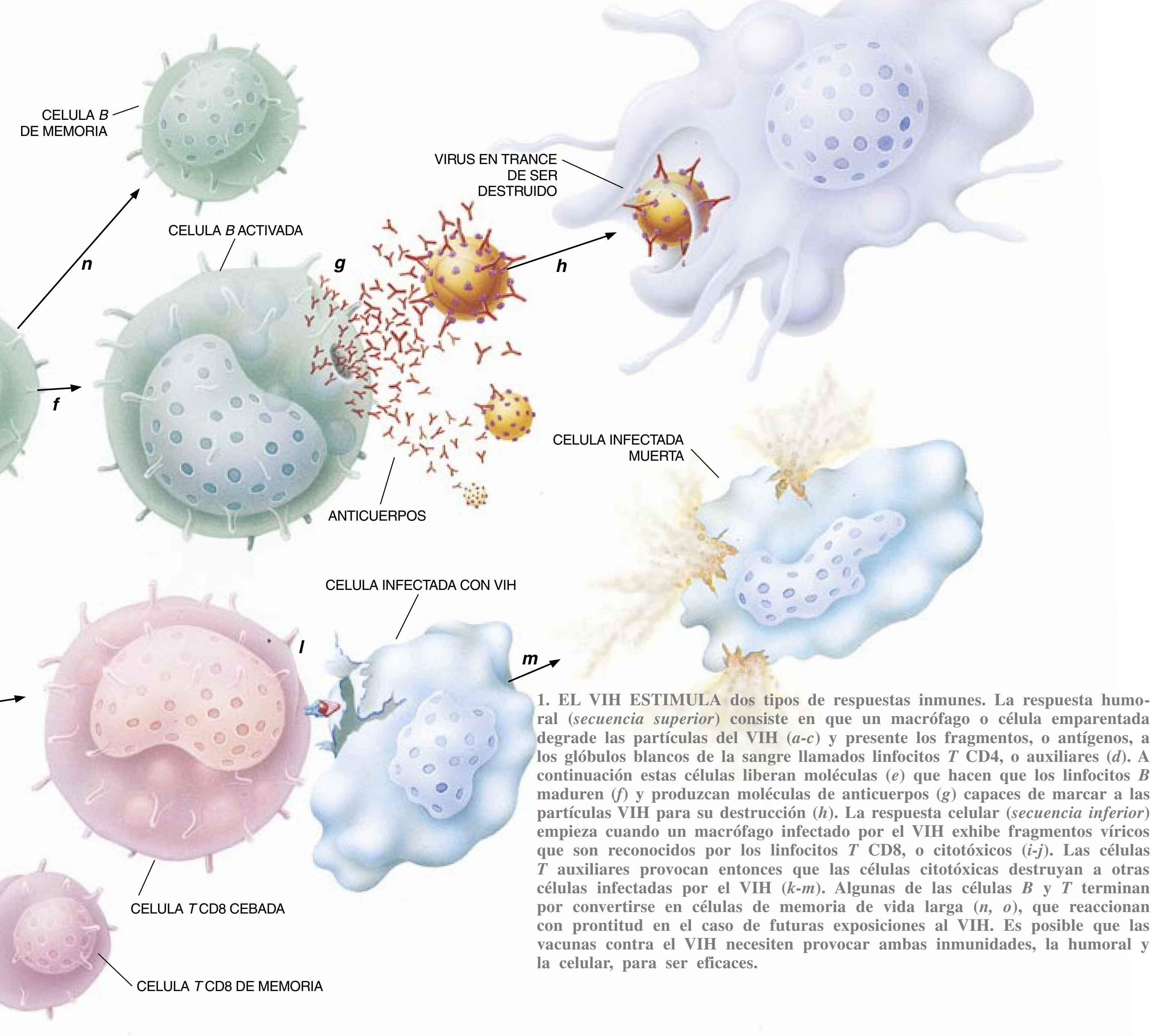


Lo que suelen hacer las vacunas antivíricas es generar anticuerpos, pero puede que a la del VIH se le exija más. Organizar mecanismos que activen por completo el sistema inmune no es nada fácil

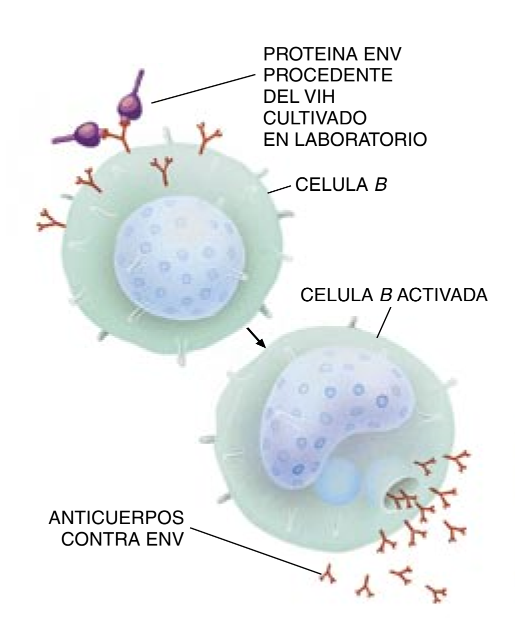
en otros. Las células de memoria no producen anticuerpos de manera inmediata, pero responden vigorosamente a las exposiciones ulteriores. Tras una vacunación se producen pequeñas cantidades de anticuerpos durante mucho tiempo, lo que, unido a la persistencia de células de memoria, permite que el organismo monte una defensa rápida si vuelve a encontrarse con el virus.

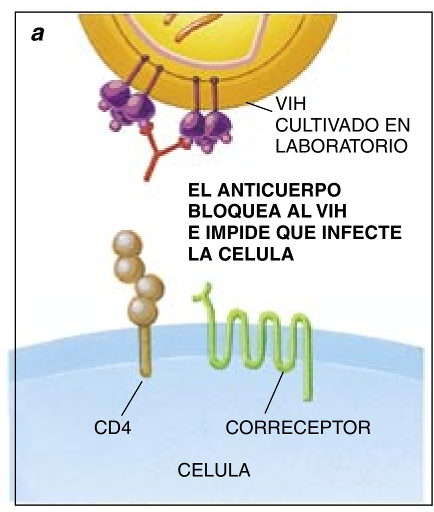
No se han logrado vacunas que estimulen de manera específica el otro brazo del sistema inmune, el llamado componente celular. Pero son muchos los investigadores del sida que están trabajando en esta dirección concreta porque, hasta ahora, las vacunas encaminadas a generar anticuerpos contra el VIH no han conseguido desencadenar la inmunidad frente a las cepas del virus que suelen encontrarse en los pacientes infectados.

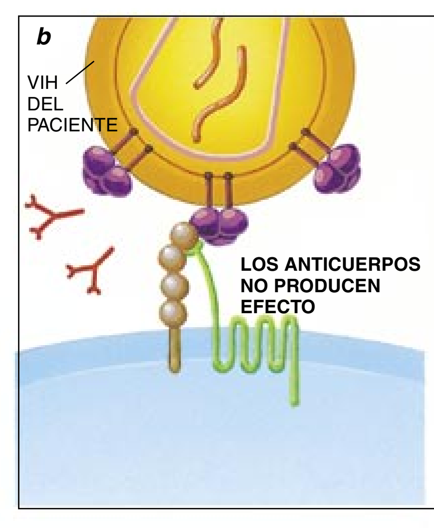
La inmunidad celular consiste en que los glóbulos blancos de la sangre llamados linfocitos citotóxicos *T* (células *T* CD8) se multiplican y viajan por el torrente sanguíneo y



1. EL VIH ESTIMULA dos tipos de respuestas inmunes. La respuesta humoral (*secuencia superior*) consiste en que un macrófago o célula emparentada degrade las partículas del VIH (*a-c*) y presente los fragmentos, o antígenos, a los glóbulos blancos de la sangre llamados linfocitos *T* CD4, o auxiliares (*d*). A continuación estas células liberan moléculas (*e*) que hacen que los linfocitos *B* maduren (*f*) y produzcan moléculas de anticuerpos (*g*) capaces de marcar a las partículas VIH para su destrucción (*h*). La respuesta celular (*secuencia inferior*) empieza cuando un macrófago infectado por el VIH exhibe fragmentos víricos que son reconocidos por los linfocitos *T* CD8, o citotóxicos (*i-j*). Las células *T* auxiliares provocan entonces que las células citotóxicas destruyan a otras células infectadas por el VIH (*k-m*). Algunas de las células *B* y *T* terminan por convertirse en células de memoria de vida larga (*n, o*), que reaccionan con prontitud en el caso de futuras exposiciones al VIH. Es posible que las vacunas contra el VIH necesiten provocar ambas inmunidades, la humoral y la celular, para ser eficaces.







2. LA PROTEINA ENV PURA, aislada a partir de virus cultivados en el laboratorio, ha sido estudiada como vacuna. Logró inducir a los linfocitos *B* para que hicieran anticuerpos que reconocieran a la proteína Env (*izquierda*). Los anticuerpos evitaron luego que VIH criados en el laboratorio infectaran a células cultivadas (*a*), quizás al bloquear el enlace con los receptores de la superficie celular o favoreciendo la eliminación del virus. Sin embargo, resulta frustrante que estos anticuerpos no hayan sido capaces de impedir la infección por virus obtenidos directamente de los pacientes (*b*).

por los tejidos en busca de células infectadas por el virus, a las que eliminan. Algunos se convierten también en células de memoria, prontas a pasar a la acción si se produjera una exposición posterior a un patógeno. A diferencia de los anticuerpos, lo que detectan los linfocitos citotóxicos *T* son las células infectadas y no el agente infeccioso mismo. Pero al igual que sucede con las células *B* del brazo humoral del sistema inmune, las células citotóxicas *T* se activan en parte por señales procedentes de las células auxiliares *T*. Puede que a la larga las vacunas anti-VIH más eficaces sean las que estimulen a la vez los brazos humoral y celular del sistema inmune, generando anticuerpos y células citotóxicas *T* activadas.

Los esfuerzos para formular una vacuna que maximice la producción de anticuerpos o la estimulación de células *T* citotóxicas se han visto dificultados por la falta de conocimientos básicos sobre la manera en que funciona el sistema inmune. Hasta que se descubra alguna forma de inducir al organismo para que genere y mantenga células de memoria y células *T* citotóxicas, quienes intenten desarrollar vacunas contra el VIH tendrán que realizar bastantes tanteos hasta dar con algún método prometedor.

La vía de los anticuerpos

Las vacunas que estimulan la producción de anticuerpos protectores han resultado adecuadas para combatir enfermedades como la poliomielitis, el sarampión y la gripe. Los candidatos a vacuna anti-VIH que más se han probado hasta ahora utilizan partes de la proteína de la envuelta (Env), la molécula que tapiza la superficie del virus. Puesto que el virus utiliza la Env como una especie de llave para conseguir entrar en las células humanas, generar anticuerpos que se fijen al extremo funcional de esta proteína debiera impedir que el VIH se engarzase con las células y las infectase.

La proteína Env, también llamada gp160, es en realidad una asociación de dos unidades: gp120, una proteína revestida de azúcares que sobresale de la membrana del virus e interactúa con receptores de la superficie de los linfocitos *T* humanos, y gp41, la pequeña proteína que ancla la gp120 a la membrana. Ambas proteínas se han utilizado como candidatas a una vacuna anti-VIH en pruebas realizadas con voluntarios.

Las proteínas desencadenaron la producción de anticuerpos en las pruebas, resultado que hizo crecer las esperanzas de que pudieran formar la base de una vacuna efectiva contra el VIH. Los anticuerpos resultantes neutralizaron de forma efectiva a los virus vivos contenidos en los tubos de ensayo, bloqueando su capacidad de infectar linfocitos humanos cultivados.

Por desgracia, los anticuerpos no reconocieron más que a las cepas de VIH que eran similares a las utilizadas para producir las vacunas. Las proteínas gp120 y gp160 de las preparaciones estaban hechas con cepas de VIH cultivadas en el laboratorio. Los anticuerpos por ellas evocados fueron ineficaces a la hora de neutralizar las cepas de VIH obtenidas directamente de los pacientes infectados, que eran perfectamente capaces de infectar otros cultivos de células.

¿Por qué razón no consiguieron neutralizar los anticuerpos a los VIH obtenidos directamente de los pacientes? La estructura de la proteína Env en cepas de laboratorio parece ser algo más laxa que la de la proteína superficial obtenida de los pacientes, que está muy plegada. Es posible que los anticuerpos para las cepas de laboratorio del VIH identifiquen partes de la proteína Env que no suelan encontrarse expuestas en la procedente de pacientes, quizá debido a que los sitios de reconocimiento estén hundidos en algún recoveco, de forma que los anticuerpos eficaces contra los virus de laboratorio no "viesen" a sus dianas en los VIH obtenidos de pacientes.

Actualmente se están desarrollando vacunas basadas en proteínas de superficie procedentes de pacientes, para que presenten Env con la configuración que tiene en ellos. Pero puede que tampoco estas vacunas funcionen. La proteína Env de tal procedencia pudiera hallarse densamente empaquetada y estar completamente camuflada por azúcares. El resultado sería que las células *B* no lograrían encontrar muchos antígenos

DAVID BALTIMORE y CAROLE HEILMAN trabajan juntos en el Comité de Investigación para la Vacuna del Sida en los Institutos Nacionales de Salud de los Estados Unidos, grupo encargado de fijar las prioridades de la investigación sobre la vacuna y de descubrir aspectos nuevos e innovadores en su estudio. Baltimore preside el comité desde su formación en 1996, siendo además presidente del Instituto de Tecnología de California. Heilman, microbióloga, es directora adjunta de la División del Sida en el Instituto Nacional de Alergia y Enfermedades Infecciosas, de Bethesda, Maryland.

y, por tanto, producirían relativamente pocos tipos de anticuerpos. Tal resultado sería coherente con el hecho de que las personas infectadas con VIH produzcan por lo general un repertorio limitado de anticuerpos que reaccionen con la superficie de los virus.

Cuando la Env se engarza a una célula, la proteína cambia algo de forma. Una vacuna que duplique la conformación adoptada por la gp120 cuando se fija a los receptores superficiales de la célula pudiera tener más éxito a la hora de generar anticuerpos capaces de bloquear el VIH para que no infecte a las células humanas.

Hay algunas personas que, aun estando infectadas por el VIH, permanecen sanas y mantienen a raya la replicación vírica. En ellas se basan algunas esperanzas para orientar los trabajos en busca de una vacuna efectiva. Algunos de tales supervivientes producen una cantidad muy pequeña de anticuerpo que, una vez aislado, es capaz de neutralizar el VIH obtenido de pacientes, con el interés adicional de que actúan así con virus procedentes de muchos tipos de paciente, requisito imprescindible para la eficacia de una vacuna antisida. Pero puede que ni siquiera en estos anticuerpos se encuentre toda la respuesta. Pruebas realizadas con cultivos de células indican que su concentración tiene que ser muy grande para que se bloquee con eficacia la entrada del VIH en las células.

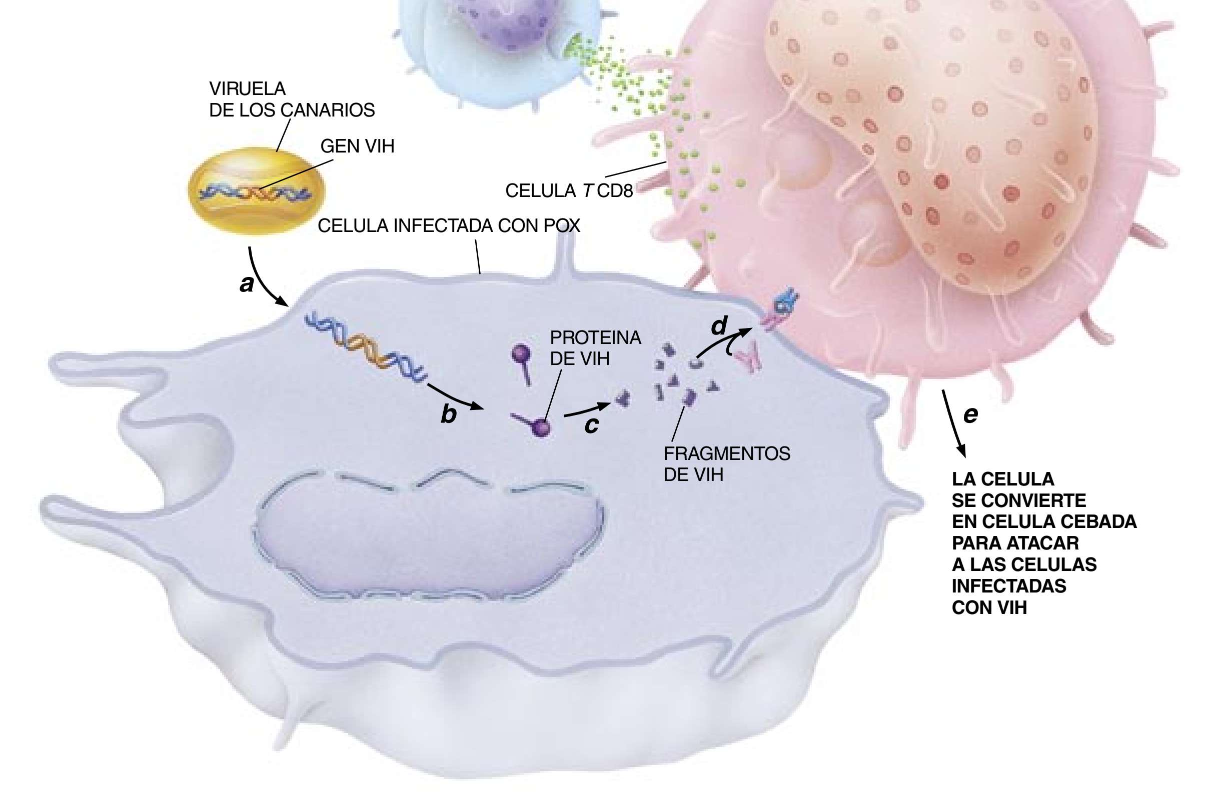
Puede que las vacunas de proteína pura no sean la mejor manera de estimular la producción de anticuerpos. En su forma aislada, la gp120 no parece tener una configuración precisa, mientras que la gp160 se amontona de forma ineficaz. Para superar tales dificultades se están explorando dos vías de vacunación diferentes, destinadas a presentar las proteínas Env en configuraciones más naturales.

Un plan de ataque consiste en utilizar partículas víricas enteras y muertas. Esta forma inhabilitada de VIH, incapaz de multiplicarse, podría presentar al sistema inmune formas más naturales de proteínas Env. Disponiendo de mejores dianas, las células *B* podrían producir anticuerpos de más calidad y en mayores cantidades.

La obtención de vacunas a base de virus muertos exige procedimientos de inactivación rigurosos, porque los residuos víricos e incluso los de material genético vírico serían peligrosos. Lo que sucede es que el tratamiento riguroso hace que la vacuna sea menos eficaz; el proceso

Métodos de vacunación en estudio

Constituyentes de la vacuna	Situación	Ventajas	Inconvenientes
Vacunas que evocan anticuerpos anti-VIH			
Proteínas de la superficie vírica, como gp120	En pruebas de la fase I y II, que comprueban la seguridad	Segura y fácil de preparar	No se logra que los anticuerpos evocados por la vacuna reconozcan el VIH de los pacientes
VIH entero y muerto	No se está estudiando en seres humanos	Debiera presentar las proteínas superficiales del VIH en una conformación relativamente natural; fácil de preparar	Cierto riesgo de que los preparados incluyan algunos virus activos; el virus inactivado podría mudar sus proteínas y volverse ineficaz
Pseudovirus (virus artificiales)	Cerca de las pruebas de la fase I	Presenta las proteínas de superficie del VIH en una conformación relativamente natural	Difícil de producir y de asegurar su estabilidad a largo plazo
Vacunas que evocan respuestas celulares			
Vectores vivos de virus (virus distintos del VIH manipulados para que porten los genes que codifican las proteínas del VIH)	En pruebas de la fase II	Puede regularse la cantidad y los tipos de proteínas víricas producidas	Complicadas de preparar; las vacunas actuales evocan respuestas inmunes modestas
ADN desnudo que contenga uno o más genes del VIH	En pruebas de la fase I	Fáciles y baratas de preparar	Cierta preocupación de que la integración de genes del VIH en las células humanas pudiera perjudicar a los pacientes
Péptidos de VIH (fragmentos de proteína)	En pruebas de la fase I	Fáciles de preparar	No provocan una gran respuesta inmune
Vacunas que provocan ambos tipos de respuesta			
Combinaciones de elementos, como proteína gp120 pura y vector de la viruela de los canarios	En pruebas de la fase II	Debería estimular a la vez las dos ramas de la respuesta inmune	Difícil de preparar
VIH vivo y atenuado	No se está estudiando en los seres humanos; se está evaluando en primates no humanos	Es la que más se parece al VIH; puede dificultar la replicación del VIH infeccioso	No es imposible que el virus produjese la enfermedad



3. LA VACUNA DE LA VIRUELA de los canarios recombinante es una de las que están siendo estudiadas como una manera de desencadenar la inmunidad basada en células contra el VIH. Tales vacunas liberan genes VIH a las células humanas (*a*). Los genes víricos son traducidos en proteínas (*b*), que a continuación son digeridas en fragmentos (*c*) y mostrados sobre la superficie celular (*d*). Dichos fragmentos estimulan a los linfocitos *T* citotóxicos específicos del VIH, o CD8, con lo que los ceban para que maten a cualesquiera células que puedan estar realmente infectadas con VIH (*e*).

de inactivación puede hacer que el VIH se desprenda de su gp120, que está engarzada de manera laxa. Esta es la razón de que muchos investigadores hayan abandonado este camino, aunque el problema de la estabilidad de gp120 pudiera ser soluble en último término.

Otro método de presentar las proteínas Env al sistema inmune es embutidas en "pseudoviriones", estructuras artificiales que se parecen a partículas víricas. Podrían fabricarse cáscaras lipídicas vacías de este tipo para que contuvieran únicamente gp160. Los pseudoviriones serían más seguros que los virus enteros y muertos, porque carecen de los genes que pudieran propagar la infección por VIH. Desgraciadamente resulta muy difícil fabricar pseudoviriones estables, a pesar de lo cual se tienen esperanzas de que dentro de poco se disponga de versiones más robustas que permitan realizar pruebas con seres humanos.

Reclutamiento de células *T* citotóxicas

Enfoques de vacunación diferentes se requieren para generar linfocitos *T* citotóxicos activos. Aunque las proteínas de superficie y las partículas víricas enteras y muertas puedan evocar la producción de anticuerpos, son estimulantes pobres de la inmunidad celular. Las células *T* citotóxicas reconocen los pequeños fragmentos de proteína extraña que aparecen en la superficie de las células infectadas. Las células inmunes infectadas generan estos péptidos antigénicos cuando digieren muestras de proteínas víricas: las proteínas de superficie y las proteínas internas que guían la reproducción y el ensamblaje de los virus. Una proteína transportadora escolta luego los fragmentos proteínicos hasta la membrana celular, donde se exponen por fuera de la célula.

Para que una vacuna VIH estimule la inmunidad basada en las células, tiene que conseguir que determinadas células sinteticen y presenten uno o más péptidos procedentes de las proteínas fabricadas normalmente por los virus. Estas células engañarían al cuerpo para que montara una respuesta inmune contra todas las células que exhibieran los péptidos víricos, incluidas las verdaderamente invadidas por el VIH.

La vacuna Sabin contra la poliomielitis, que está constituida por un poliovirus vivo, logra provocar la actividad de las células *T* citotóxicas contra las células infectadas por la poliomielitis, pero no causa la enfermedad porque el virus ha sido debilitado en el laboratorio mediante determinadas mutaciones genéticas. El problema es que hasta ahora no se han encontrado mutaciones que transformen el VIH en una vacuna que sea completamente segura.

No obstante, se trabaja en otros métodos para inducir a las células a que produzcan y muestren proteínas VIH. Uno de ellos consiste en la preparación de lo que se ha llamado una vacuna de vector vivo, que aprovecha las habilidades de diversos virus para invadir células. Se insertan genes seleccionados de VIH en un virus que no sea dañino y se le deja que transporte el ADN a las células del cuerpo. Puesto que los genes son los programas para fabricar proteínas, las células infectadas producirán proteínas de VIH. A continuación estas proteínas víricas son desmenuzadas y enviadas a la superficie celular, donde pueden atraer la atención de los linfocitos *T* citotóxicos errantes. Las células *T*, a su vez, debieran multiplicarse en respuesta a la estimulación antigénica y mantenerse dispuestas a matar a cualquier célula que se infecte realmente con el VIH.

Las vacunas de vector vivo más ampliamente probadas se basan en el virus de la viruela de los canarios.

Este pariente no patógeno del virus de la viruela ordinaria penetra en las células humanas, pero es incapaz de ensamblar nuevas partículas víricas. Los investigadores han manipulado virus de la viruela de los canarios para que liberen los genes que dirigen la producción de Env, de gp120 y de varias proteínas VIH que no son de superficie, como la Gag (la proteína nuclear) y la proteasa.

Hasta el momento, las vacunas de la viruela de los canarios probadas en seres humanos han resultado ser seguras y han evocado modestas respuestas inmunes basadas en células *T* citotóxicas. Para estimular una respuesta inmune más vigorosa se están desarrollando virus que produzcan mayores cantidades o variedades de las proteínas VIH en el interior de las células infectadas. La administración de dosis múltiples de dichas vacunas pudiera ayudar a generar y a mantener un número elevado de células *T* citotóxicas activas.

Otras investigaciones se dirigen a la administración de péptidos víricos (fragmentos de proteínas víricas) para inducir una respuesta inmune. Puesto que los péptidos antigénicos derivados de las proteínas víricas activan a los linfocitos *T* citotóxicos, quizá los péptidos funcionen como vacuna. Por desgracia, los péptidos por sí solos no evocan una respuesta inmune fuerte, ni celular ni basada en anticuerpos, en los seres humanos. La causa pudiera ser que se degraden antes de llegar a las células diana o que no sean presentados con eficacia por las células que los encuentran. Las vacunas a base de péptidos pudieran beneficiarse del desarrollo de mejores auxiliares, es decir, de materiales que se suministran junto con una vacuna y que inducen al sistema inmune a responder de manera más enérgica.

Un método relativamente nuevo para desencadenar una respuesta inmune celular consiste en inyectar ADN "desnudo" del VIH: material genético sin proteínas ni lípidos que lo transporten ni lo protejan. Hubo un tiempo en que se creyó que el ADN desnudo se degradaría con demasiada rapidez para ser eficaz como vacuna, pero la verdad es que penetra en las células y puede dirigir la producción de proteínas víricas. En estudios realizados con animales, ratones y primates no humanos, las vacunas de ADN han logrado generar linfocitos *T* citotóxicos que reconocen las proteínas VIH. En algunos experimentos, aunque no en todos, la vacuna de ADN protegió a los animales de ulteriores infecciones con VIH. Se está evaluando la seguridad y la efectividad de este enfoque mediante nuevos estudios con animales y con seres humanos.



4. MACACO BUNDER, una de las especies de monos que se utilizan en los estudios de vacunas. Los animales que han recibido una versión simiesca, atenuada, del VIH han sido capaces de resistir infecciones subsiguientes por parte del virus normal de los primates. El dato preocupante es que la propia vacuna haya causado la enfermedad en algunos monos.

Métodos combinados

Los métodos más eficaces, y los que se encuentran más lejanos de aplicarse a los seres humanos, incorporan elementos para estimular ambos brazos de la respuesta inmune. El paciente podría recibir una vacuna de virus de la viruela de los canarios que fuese portador del gen *Env* para estimular la inmunidad celular. Pasados unos meses se le aplicaría gp120 pura para provocar la generación de anticuerpos. Esta estrategia de combinación se denomina impulso de cebado, porque el vector de la viruela de los canarios ceba a las células *T* citotóxicas y después la proteína gp120 refuerza, o impulsa, la respuesta inmune al provocar la producción de anticuerpos.

Las primeras pruebas han demostrado que los seres humanos vacunados con este método desarrollan inmunidad humoral y celular. Pero los anticuerpos generados lo han sido frente a cepas de VIH adaptadas al laboratorio y la respuesta de la célula *T* citotóxica no ha sido fuerte. La siguiente generación de vacunas de combinación utilizará virus de la viruela de los canarios que porten más genes VIH capaces de producir mayores cantidades de proteína vírica, mientras que el impulsor contendría proteínas gp120 hechas a partir de VIH aislados de pacientes. Dichas vacunas se están produciendo actualmente y pronto podrían estar listas para ser probadas con seres humanos.

Muchos otros investigadores continúan intentando desarrollar vacunas a partir del VIH vivo y atenuado. Puesto que tales vacunas imitarían al VIH verdadero, en teoría serían capaces de inducir la inmunidad celular, la inmunidad basada en anticuerpos y quizás otros modos de protección desconocidos. Suprimiendo de forma sistemática los genes necesarios para la replicación del VIH, se espera desarrollar una variante del virus que pueda producir una respuesta inmune fuerte sin generar la enfermedad.

Un grupo de médicos ha decidido hace poco participar voluntariamente en la primera prueba clínica de una vacuna de VIH vivo y atenuado, que permitiría supervisar la respuesta inmune de los voluntarios y estudiar la seguridad a largo plazo de la vacuna. Los médicos voluntarios creen que el valor de estas comprobaciones supera a los riesgos que corre su salud. Su plan sigue siendo muy controvertido y nosotros nos contamos entre quienes creen que los virus VIH atenuados deberían investigarse mucho más todavía en primates no humanos antes de pasar a las pruebas humanas.

Monos y sida

Las vacunas basadas en un virus de la inmunodeficiencia simiana

(VSI), emparentado con el VIH y que infecta a monos, pero vivo y atenuado, se han probado con macacos y con otros primates no humanos. Los monos infectados con cepas patógenas de VSI desarrollan un síndrome parecido al del sida. Al estudiar este modelo simio se puede comprobar la seguridad de vacunas vivas y atenuadas y su capacidad para proteger a los animales cuando vuelvan a exponerse a cepas patógenas del VSI. Varias vacunas VSI atenuadas diferentes han resultado ser notablemente efectivas a la hora de suprimir el crecimiento de un virus de tipo salvaje.

La base para esta inmunidad de los macacos no está clara: los animales que están efectivamente protegidos del riesgo del VSI no tienen necesariamente grandes niveles de anticuerpos neutralizadores o de linfocitos *T* citotóxicos activados. Los efectos protectores pudieran ser consecuencia de determinada combinación de anticuerpos, actividad de células *T* auxiliares y células *T* citotóxicas, pero también pudieran derivarse de otros aspectos de la inmunidad. Se necesitan más investigaciones para determinar exactamente la manera en que las vacunas VSI consiguen conferir protección.

Aunque los estudios iniciales indicaban un elevado grado de seguridad para el VSI vivo y atenuado, nuevos estudios más amplios están empezando a mostrar que un número creciente de animales vacunados avanza hacia síndromes parecidos al del sida, incluso en ausencia de exposición a virus del tipo salvaje. Se están empezando a realizar estudios con mayor número de animales, pero los resultados parecen indicar que las vacunas vivas y atenuadas puede que no proporcionen inmunidad completa y a largo plazo, e incluso pudieran causar la enfermedad. Estos datos implican también la cautela con que ha de procederse antes de probar tales vacunas en los seres humanos.

Pronóstico

Si el sistema inmune de los individuos infectados con VIH no puede eliminar el virus, ¿por qué habría de esperarse que una vacuna cuya misión es desencadenar las mismas respuestas logre bloquear la infección? Las vacunas pudieran proporcionar al cuerpo una "ventaja inicial" inmunológica al predisponer al sistema inmune para que atacase al VIH tan pronto como aparezca, en lugar de tomarse su tiempo para iniciar la defensa desde cero. Al actuar así, la inmunidad inducida por la vacuna pudiera tener éxito contra el virus allí donde el cuerpo infectado no lo consigue de manera natural.

Pero hasta ahora no hay pruebas de que la vacunación contra el VIH sea posible, porque ninguna candidata a vacuna protectora ha llegado todavía a las pruebas de la fase III, que son las que se realizan a gran escala para evaluar la efectividad en los seres humanos. La gran variabilidad genética del VIH pudiera reducir además la utilidad de cualquier vacuna que se consiga, porque las cepas de VIH aisladas de pacientes de distintas partes del mundo poseen estructuras muy variadas de Env y, en menor medida, de otras proteínas. Sigue sin estar claro si estas diferencias, u otras adicionales que todavía no se hayan descubierto, no serán una rémora importante para el desarrollo de vacunas.

Pero hay esperanzas. A medida que la patogénesis de la infección por VIH se ha ido comprendiendo mejor, se ha descubierto que, si se logra mantener bajas las concentraciones del virus en la sangre, las personas infectadas puede que no lleguen nunca hasta el estadio de sida. Es un dato alentador, porque indica que incluso una vacuna parcialmente eficaz pudiera ser útil a la hora de limitar la cantidad de virus de los pacientes, con lo que podría reducirse su capacidad infecciosa y los síntomas que padecen.

Es improbable que durante el próximo lustro se consiga una vacuna adecuada para su uso generalizado entre los seres humanos. Aunque la combinación cebado-impulso parezca estimular la inmunidad celular y generar buenos anticuerpos de amplio espectro, todavía se precisarán grandes pruebas clínicas para demostrar su valor. Estas pruebas por sí solas llevarán varios años. Mientras tanto se continuará explorando con afán cualquier método que pueda ayudar a que el sistema inmune combata el VIH.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HIV VACINES... WHERE ARE WE GOING? C. A. Heilman y D. Baltimore en *Nature Medicine*, volumen 4, n.º 5, páginas 532-534; mayo 1998.

Medidas preventivas

Thomas J. Coates y Chris Collins

La modificación de determinados comportamientos sigue siendo la forma primordial de limitar la epidemia

Dado que las vacunas se encuentran a varios años de distancia todavía, la única forma de prevención de nuevas infecciones por VIH aplicable a gran escala es la modificación de las conductas por las que se transmiten. Se trata especialmente de las prácticas sexuales y de las relativas a la inyección de drogas.

Siendo obvio que la mayor parte de las personas no va a optar por la abstinencia sexual, los servicios de sanidad pública han centrado sus esfuerzos en propugnar la adopción de prácticas sexuales menos arriesgadas, sobre todo mediante el uso de preservativos. Que cabe persuadir a la gente para que aplique tales medidas queda bien ilustrado por lo sucedido con los grupos homosexuales masculinos de San Francisco durante los años ochenta. Es probable que unos 8000 individuos sufrieran la infección de VIH en cada uno de los años 1982 y 1983. Tal cifra había descendido a unos 1000 un decenio más tarde y en la actualidad se estima que ya es inferior a 400 anuales. La razón principal de tal declive ha sido el descenso en picado de la práctica del coito anal sin protección, fruto de campañas informativas sobre prácticas sexuales menos peligrosas.

Las campañas informativas dirigidas a determinados grupos de riesgo constituyen la forma esencial de persuadir a los implicados para que adopten medidas preventivas. La información sobre contagio de VIH y sobre prácticas sexuales de menor riesgo se difundió en San Francisco a través de los medios de comunicación, aparte de estar disponible en centros de la sociedad homosexual, como iglesias, clubes y otras organizaciones. Los programas dirigidos a la industria del sexo mercantilizado han reducido en gran medida los riesgos de contagio por VIH tanto para quienes en ella trabajan como para los clientes. El Ministerio de Salud Pública de Tailandia ha influido para que el uso de preservativos en los prostíbulos sea del cien por cien. El propio Ministerio suministra los condones y promociona a través de los medios de comunicación las medidas de higiene sexual. El tanto por ciento de hombres que utilizan preservativos en sus visitas a los prostíbulos ha aumentado del 61 al 92,5% entre 1991 y 1995. Los índices de infección por VIH entre los reclutas del ejército tai descendieron entre 1993 y 1995 del 12,5% al 6,7%, debido en parte a la protección de los preservativos y también al menor número de ellos que recurrieron a prostitutas.

Los análisis y el seguimiento asesorado reducen las conductas de riesgo de todos los individuos, infectados y no infectados, como refleja un estudio de gran alcance efectuado en tres países en desarrollo. Cierto número de trabajos de investigación en los que participaron parejas heterosexuales "discordantes" —que son aquellas en las que sólo uno de los miembros es VIH positivo— han demostrado que, tras un análisis con resultado positivo, el asesoramiento profesional puede proteger en gran medida al compañero no infectado. El uso de preservativos en parejas discordantes que fueron asesoradas aumentó del 3 al 57 por ciento en Ruanda, mientras que el aumento fue del 5 al 77 por ciento en Congo (el antiguo Zaire).

Una educación sexual amplia en las escuelas puede servir para promocionar las medidas de protección y para reducir la actividad sexual de los jóvenes. El análisis de 23 programas escolares indicó que los adolescentes que habían recibido información y enseñanza específicas sobre la manera de insistir en que sus compañeros usaran preservativo eran menos proclives a las prácticas sexuales. Quienes las realizaban lo hacían con mayor seguridad y menor frecuencia que aquellos otros a los que no se les había presentado material formativo específico sobre el sida. Los adolescentes que no han iniciado la práctica sexual y que reciben información sobre el VIH tienen sus primeras experiencias sexuales más tardíamente y con menor número de compañeros que los estudiantes que reciben información al respecto tras haber empezado a tener relaciones sexuales.

La influencia de los compañeros y las actuaciones sociales constituyen complementos excelentes de una educación más general. Una investi-

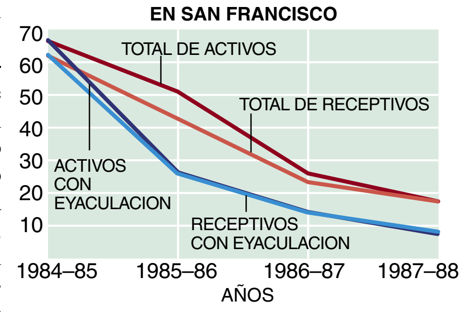


1. ESTAS MANIFESTANTES tratan de educar al público. Estudios financiados por el gobierno estadounidense han demostrado que el reemplazo de agujas contribuye a reducir la transmisión de VIH sin aumentar el consumo de drogas.

gación realizada entre los homosexuales varones de ciudades pequeñas identificó a los que tenían un papel preponderante en la opinión popular. Se instruyó a estos "individuos influyentes" para que defendieran entre sus amigos y conocidos la adopción de precauciones. El tanto por ciento de hombres que practicaron el coito anal sin protección descendió un 25 por ciento en sólo dos meses, el uso de preservativos aumentó un 16 por ciento y el número de quienes tuvieron más de un compañero sexual disminuyó un 18 por ciento. En otras dos ciudades parecidas, en las que no se hizo intervenir a estos "líderes de opinión", no se produjeron variaciones. Otro estudio del mismo tipo puso de manifiesto que la tasa de cópulas sin protección entre hombres jóvenes homosexuales descendió más del 50 por ciento. Un descenso tan importante en las conductas de riesgo podría reducir los índices de contagio de VIH lo suficiente para detener la epidemia entre tales grupos.

La publicidad y la mercadotecnia pueden modificar también las normas sociales, haciendo más aceptables los preservativos. Una campaña lanzada por los medios de comunicación de Congo, abogando por prácticas sexuales más seguras, provocó un aumento de las ventas de preservativos, que pasaron de 800.000 en 1988 a más de 18 millones en 1991. Una encuesta realizada en ese país señaló que el porcentaje de quienes declaraban practicar la fidelidad mutua aumentó desde un 29 a un 46 por ciento en un período de un año. Una campaña publicitaria insistente, dirigida a personas de entre 17 y 30 años, consiguió elevar la utilización de preservativos del 8 al 50 por ciento entre 1987 y 1991 en Suiza. La cifra subió del 17 al 73 por ciento en el caso de los jóvenes de 17 a 20 años.

THOMAS J. COATES y CHRIS COLLINGS han sido colegas en el Centro de Estudios de Prevención del Sida en la Universidad de California, en San Francisco. Coates continúa siendo director de ese Centro y del Instituto de Investigación del Sida que existe en él. Ha sido asesor de varias importantes instituciones asociadas al estudio y prevención del sida. Collins, que fue allí investigador de políticas sanitarias, escribe sobre políticas de prevención desde Washington, D.C.



2. LA DISMINUCION de las conductas arriesgadas fue acusada y rápida tras las actuaciones educativas dirigidas específicamente a ello. Cuando se logra llegar a grupos culturales concretos de manera aceptable para ellos, la prevención consigue buenos resultados.

Quienes critican la presentación de materiales de tipo sexual explícito proclaman su temor a que aumente la actividad sexual. En el estudio suizo, sin embargo, se observó que permanecía invariable y lo único que aumentaba era la seguridad de las prácticas sexuales.

Facilitar el acceso a los preservativos es otro de los métodos de aumentar su utilización, ya sea regalándolos o haciendo menos embarazosa su adquisición. Un estudio publicado en 1997 en el *American Journal of Public Health* informaba de que, cuando se pusieron a la venta en los centros de enseñanza media, su utilización aumentó sin que lo hiciera el número de compañeros sexuales ni disminuyera la edad de comienzo de la actividad sexual. En un centro de rehabilitación de drogadictos se observó que la frecuencia de adquisición de condones era cinco veces mayor cuando podía hacerse en privado, en los lavabos, que en público, en las salas de espera. Es evidente que la sensación de intimidad hace más fácil la adquisición de preservativos.

El diálogo entre médico y paciente puede contribuir también a reducir las conductas de riesgo, pero los médicos han dejado escapar valiosas oportunidades. Un estudio reciente ponía de manifiesto que solamente el 39 por ciento de los adolescentes habían hablado alguna vez con sus médicos sobre la prevención del VIH y que sólo el 15 por ciento tocaba el tema de su vida sexual; sin embargo, casi el 75 por ciento afirmó estar dispuesto a confiar a sus médicos información sobre sus hábitos sexuales, mientras que hasta el 90 por ciento opinó que les sería útil hablar de sexo con un médico. El 94 por ciento de los médicos interrogan a sus pacientes sobre el hábito de fumar; no menos oportuna sería la exposición franca de la conducta sexual en la consulta del médico.

El tratamiento de las drogadicciones tendría que ser uno de los métodos de primera línea para reducir los riesgos de infección por VIH u otras enfermedades en quienes consumen drogas de inyección intravenosa. Los métodos de sustitución, como el tratamiento con metadona de los heroinómanos, reducen claramente el riesgo de transmisión del VIH por compartición de jeringuillas.

La disponibilidad de agujas estériles puede contribuir a la protección de quienes sigan usando drogas inyectables. Los programas de reposición de jeringuillas, a pesar de las controversias que suscitan, han demostrado reducir el riesgo de infecciones víricas en muchos estudios realizados en todo el mundo. Seis estudios financiados por el gobierno estadounidense han hallado que dichos programas contribuyen a reducir el contagio de VIH sin inducir a mayor consumo de drogas. Ciertas administraciones han ido más allá del mero reemplazo de jeringuillas. Connecticut puso en marcha en 1992 un programa modelo en el cual se permitía a las farmacias la venta sin receta médica de hasta 10 jeringuillas, y a los particulares, su posesión. Entre quienes reconocieron haber compartido jeringuillas alguna vez, esta práctica descendió del 74 al 28 por ciento, mientras que la compra de jeringuillas en el mercado negro cayó del 74 al 28 por ciento. Quedó demostrado también que los temores de que aumentase por esta razón el consumo de drogas carecían de fundamento, pues muchos estudios han demostrado que la disponibilidad de agujas no aumenta el consumo de drogas ilegales.

El apoyo directo a los consumidores de drogas también puede ser eficaz. Un programa mantenido por el National Institute on Drug Abuse hizo un seguimiento de 641 adictos de drogas inyectables, animándoles sin cesar a buscar tratamiento para salir de su adicción y, mientras tanto, a adoptar métodos de inyección sin riesgos. Al cabo de cuatro años no habían contraído el VIH más que 90 individuos, la mitad de lo estadísticamente esperado entre tal grupo.

Medidas ineficaces

La información que sólo se presenta una vez tiene menos éxito que las intervenciones que adiestran en y refuerzan las conductas positivas por repetición. Los jóvenes, sobre todo, necesitan aprender bien la forma de utilizar los preservativos y han de saber mostrarse firmes en la exigencia de su uso antes de que su conducta cambie de manera importante.

No sirve el mismo mensaje para llegar a los muchos y variados grupos a los que amenaza la epidemia de sida. Los métodos educativos han de adaptarse a la etnia, la cultura y las preferencias sexuales de cada uno de ellos. El ejemplo de San Francisco al realizar una campaña dirigida específicamente a los homosexuales varones atestigua la utilidad de tal enfoque.

Los programas de abstinencia prestan un flaco servicio a la juventud. No hace mucho que el Congreso estadounidense aprobó un presupuesto de 250 millones de dólares para cinco años de educación sexual restringida a explicaciones sobre la abstinencia sexual pura. Tales tentativas sirven para nutrir programas políticos, pero no para atender a las necesidades sociales, pues dos terceras partes de los estudiantes de los últimos cursos de enseñanza media declaran haber tenido relaciones sexuales completas. Los programas educativos, al tiempo que predican la abstinencia, tendrían que proporcionar a los jóvenes los conocimientos y los medios necesarios para protegerlos del VIH.

Las medidas coercitivas para identificar a los portadores de VIH y a sus compañeros sexuales tienen gran probabilidad de tener efectos negativos. En nuestra época, en la que ya existen terapias prometedoras contra el VIH, es importante que los individuos infectados reciban atención médica lo antes posible tras el diagnóstico. Una terapia precoz puede impedir también que las madres gestantes lo transmitan a sus hijos. Pero la realización obligatoria de análisis y la amenaza de medidas coercitivas para la identificación de contactos sexuales minan la confianza en el sistema médico. Una encuesta realizada en 1995 en Los Angeles puso de manifiesto que el 86 por ciento de los participantes no se sometería a una prueba de VIH si supiera que sus nombres iban a ser entregados a las autoridades. Si se dan facilidades para la realización de análisis anónimos y confidenciales, serán más las personas a las que se terminará atendiendo y asesorando.

El conformismo supone también una amenaza para las medidas preventivas. Hay que seguir desarrollando y refinando las actuaciones dirigidas a los grupos de riesgo. Especialmente las mujeres tienen necesidad de métodos que las protejan de compañeros infectados. Cuando se dispone de preservativos femeninos, sus índices de enfermedades de transmisión sexual son inferiores a los que se producen si no hay más que preservativos masculinos. Microbicidas más eficaces servirían también para proteger a las mujeres cuyas parejas no acepten prácticas sexuales menos arriesgadas.

La prevención es, por muchos conceptos, mucho menos apasionante que el desarrollo de tratamientos milagrosos y de vacunas. Pero las actuaciones sociales y políticas eficaces constituyen los mejores instrumentos disponibles para hacer frente a una epidemia en la que 16.000 personas de todo el mundo resultan infectadas cada día. Ha de continuar la investigación concertada sobre vacunas anti-VIH. Pero aunque se dispusiese de una vacuna, no es verosímil que confiera una protección absoluta a todas las personas vacunadas y su distribución a todos los que la necesiten es otro de los obstáculos.

Las actuaciones sociales seguirán desempeñando un importante papel en los esfuerzos por confinar la epidemia de VIH, siendo, de hecho, una cuestión de vida o muerte. Con palabras de June Osborn, antigua presidenta de la Comisión Nacional del Sida en los Estados Unidos: “Si la medicina preventiva y la sanidad pública se realizan correctamente, no pasa nada y todo resulta muy aburrido. Todos deberíamos rezar por ese tipo de aburrimiento.”

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PREVENTION OF HIV INFECTION: LOOKING BACK, LOOKING AHEAD. J. Stryker, T. J. Coates, P. DeCarlo, K. Haynes-Sanstad, M. Shriver y H. J. Makadon en *Journal of the American Medical Association*, vol. 273, n.º 14, págs. 1143-1148; 12 de abril, 1995.

Información sobre muchos temas relacionados con la prevención del sida la proporciona el Centro para el Estudio de la Prevención del Sida y está disponible en la red, en la dirección http:/www.caps.ucsf.edu.

Nunca es demasiado tarde

Susan Buchbinder

El tratamiento puede disminuir la probabilidad de infección tras un hecho arriesgado

Suponga usted que es médico de urgencias y le llega una paciente diciendo que ha sido violada dos horas antes. Manifiesta su miedo de haberse expuesto al VIH, el virus que causa el sida, pero ha oído que existe una píldora para prevenir la infección.

¿Se puede hacer algo realmente para impedir la replicación del virus y que brote la infección? ¿Respondería de manera diferente si la paciente tuviera un compañero seropositivo y se le hubiera roto el preservativo durante el coito? ¿Cómo tratar a un paciente que esporádicamente se emborracha y tiene relaciones sexuales con gentes desconocidas?

Por desgracia no hay respuestas fáciles. Hasta hace pocos años los médicos no tenían ningún dato que pudiera sacarles del brete y sigue quedando mucho por saber. Hay diversos estudios, sin embargo, que indican que, en determinadas circunstancias, si se suministra una medicación anti-VIH tras la exposición al virus (esto es, administrando profilaxis de postexposición, o PPE) pudiera impedirse la infección.

Los experimentos de laboratorio indican que administrar fármacos anti-VIH, bien sea antes de la exposición, bien hasta 24 horas después, protege a algunos animales de prueba de resultar infectados con VIH o con otro virus semejante que infecta a los monos. La efectividad de la protección depende del tipo y de la duración de la terapia antivírica.

Los estudios realizados con seres humanos también despiertan la esperanza de que la PPE pueda funcionar. La transmisión del VIH de madres a hijos se reduce si las mujeres son tratadas con un medicamento llamado zidovudina (AZT) durante el embarazo y el parto y si los bebés son tratados inmediatamente después del parto. En esta situación, sin embargo, la protección pudiera provenir básicamente de la zidovudina que circula por la sangre del bebé en el momento de la exposición, más que de la administrada posteriormente.



1. MAHLON JOHNSON, médico patólogo, se infectó con el virus del sida en un accidente laboral hace varios años. Posa junto a sus medicinas. Un tratamiento tras una exposición accidental al virus puede ahora impedir a veces la infección.

Se tienen también otros datos favorables derivados de un estudio sobre personal sanitario expuesto a la sangre de pacientes infectados con VIH por pinchazos de aguja u otros accidentes que horaden la piel. Los resultados fueron que el personal sanitario expuesto al VIH pero que no se había infectado había recibido PPE (con zidovudina) en proporción significativamente mayor que quienes sí se infectaron. Pero este dato no constituye una prueba definitiva de que la PPE reduzca la infección y ciertas dificultades metodológicas impiden extraer conclusiones generales.

Dada la incierta eficacia de la PPE, los médicos queremos estar seguros de que el tratamiento no supone riesgos inaceptables para nuestros pacientes. Conocemos los efectos secundarios a corto plazo gracias a la experiencia con pacientes infectados por VIH, pero no sabemos casi nada sobre las consecuencias a largo plazo de la utilización de fármacos contra el VIH en personas que de hecho no lo tengan. Y no se tiene más que una somera idea del tiempo que haya que seguir administrando la PPE.

A pesar de todas estas dudas, los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades norteamericanos han recomendado que a todo el personal médico que haya tenido contacto claro con sangre u otros fluidos corporales infectados con VIH se le asesore y, en su caso, se le ofrezca PPE contra el VIH. Los fármacos recomendados para este tratamiento son algunos de los que se usan de modo general para tratar una infección declarada: zidovudina, lamivudina (3TC) y quizá también alguno de los nuevos medicamentos llamados inhibidores de proteasas. La combinación de estos productos se sabe que es eficaz contra el VIH, son de fácil adquisición y tienen relativamente pocos efectos adversos graves. Se pueden administrar otros medicamentos, en función de la probabilidad de que el paciente originario hospedase virus resistentes y de otras circunstancias clínicas previas de la persona expuesta.

Aunque el término vulgar de "píldora de la mañana siguiente" pueda hacer pensar en un arreglo sencillo, la pauta profiláctica recomendada supone la administración de los fármacos al menos dos veces por día durante un total de cuatro semanas. Los pacientes que se decantan por la PPE deben prepararse para un cierto número de efectos secundarios, que comprenden dolores de cabeza, náuseas, fatiga y anemia. También deben estar dispuestos a afrontar tanto la incertidumbre de riesgos a largo plazo como el hecho de que el VIH se vuelva resistente muchas veces a los fármacos que se encuentra. Si la infección se produjera a pesar de la profilaxis, cualquier resistencia a los fármacos antivíricos que se derivara reduciría las opciones disponibles para tratar la infección.

Estas recomendaciones que se hacen al personal sanitario expuesto accidentalmente, ¿valen también para aquellos cuya exposición se debe a relaciones sexuales o a las agujas con las que se inyectan drogas? La respuesta, poco satisfactoria ciertamente, es: quizás.

Algunos tipos de exposiciones no laborales pueden resultar tan peligrosas como los pinchazos accidentales con una aguja. El riesgo de quedar infectado por un único coito anal receptivo sin protección realizado con un hombre de quien no se sepa si es portador del VIH puede que sea tan alto como el del pinchazo con una aguja utilizada con un paciente. El riesgo asociado con la utilización aislada de utensilios para inyecciones contaminados parece ser comparable.

Mas las circunstancias que rodean las exposiciones no laborales difieren mucho de las que tienen lugar en el ámbito sanitario, de manera que pudieran disminuir la eficacia de la PPE y hasta aumentar sus peligros.

Un profesional que se pinche con una aguja suele darse cuenta inmediata del peligro y puede obtener el tratamiento gratis. Los médicos que le atiendan pueden consultar el historial clínico del paciente originario y adaptar el tratamiento para que tenga las mayores probabilidades de ser eficaz. Un ejemplo pudiera ser la evitación de medicamentos cuya ineficacia ya hubiese quedado demostrada con él.

Protocolos típicos para la prevención postexposición

Fármaco	Tipo
Tratamiento con dos fármacos preferido:	
Zidovudina (Retrovir, AZT)	Inhibidor de transcriptasa inversa
y	
Lamivudina (Epivir, 3TC)	Inhibidor de transcriptasa inversa
Tratamiento alternativo con dos fármacos:	
Stavudina (Zerit, d4T)	Inhibidor de transcriptasa inversa
y	
Didanosina (Videx, ddI)	Inhibidor de transcriptasa inversa
Si el paciente originario se encontrase en un estadio avanzado de infección, tuviese una carga vírica elevada o hubiese sido tratado previamente con cualquiera de los dos fármacos del tratamiento elegido, considérese añadir:	
Nelfinavir (Viracept)	Inhibidor de proteasa
o	
Indinavir (Crixivan)	Inhibidor de proteasa

2. EL TRATAMIENTO medicamentoso administrado con prontitud puede reducir las probabilidades de contraer una infección por VIH tras una exposición arriesgada.

Por el contrario, lo corriente es que los individuos expuestos a través de las relaciones sexuales o por el uso de drogas desconozcan si su pareja es portadora, sin que se disponga normalmente de sus historiales clínicos. Incluso cuando la gente se dé cuenta inmediatamente de que ha quedado expuesta al VIH, puede resultarle difícil acudir rápidamente a los servicios médicos o pagarse medicamentos caros.

Este obstáculo es grave, porque los datos disponibles indican que la PPE tiene que empezar enseguida para que sea efectiva. Tan es así que un tratamiento comenzado algunas horas después es más eficaz que otro comenzado al día siguiente, siendo probablemente poco lo que se pueda esperar de las actuaciones iniciadas 72 horas después de la exposición.

Incluso aunque la exposición al VIH sea inequívoca y el paciente acuda inmediatamente a la consulta, puede haber otros factores que desaconsejen el tratamiento, como serían que el paciente no pudiese tomar la medicación prescrita tal como se le ordena o la exposición repetida al VIH durante el tratamiento, lo que pudiera llevar a un virus resistente. Hay mucha gente a la que le cuesta seguir estrictamente un régimen, mientras que a otros les resulta difícil tomar medidas de seguridad en las relaciones sexuales o al aplicarse drogas de forma intravenosa.

El tratamiento profiláctico comporta algunos otros riesgos menos evidentes. El simple hecho de saber que existe pudiera inducir a algunas personas a asumir más riesgos de los normales. Existe así el riesgo real de que su aplicación a las exposiciones no laborales incremente en algunos casos la probabilidad de infección. Esta consideración no parece aplicable al personal sanitario, que no es probable que baje la guardia simplemente por la disponibilidad de la PPE.

Están en curso o en fase de proyecto varios estudios cuyo fin es aclarar los beneficios y los inconvenientes de la PPE en los individuos que se expusieron de manera no laboral, de manera que los servicios sanitarios puedan ofrecer recomendaciones provechosas. Mientras se conocen sus resultados, se han publicado algunas pautas generales.

Los médicos que se encuentren con un paciente preocupado deben evaluar la probabilidad de que ocurra una infección por VIH, considerando el tipo de exposición y la probabilidad de infección del compañero. Se debe ofrecer asesoramiento y proporcionar referencias. Como ha habido casos de transmisión del VIH a resultas de crímenes sexuales, en muchos de estos casos es recomendable la PPE. Otras exposiciones aisladas de gran riesgo (como la rotura de un preservativo) pueden justificar la PPE, especialmente en el caso del receptor, para quien el riesgo de adquirir el VIH es mayor. Como la multiplicidad de las terapias incrementa también los riesgos del tratamiento, la mayoría de los médicos no recomendarían la PPE a las personas expuestas repetidamente al VIH.

La profilaxis de postexposición es, como mucho, un último recurso para prevenir una infección. Las verdaderas esperanzas de detener la difusión mundial de este virus mortal siguen residiendo en los programas de prevención general antes de la exposición y, en último término, en una vacuna eficaz.

SUSAN BUCHBINDER es directora de la sección de investigación sobre VIH del Departamento de Salud Pública de San Francisco, y profesora asociada en la Universidad de California en San Francisco.

Dilemas éticos

Tim Beardsley

El sida plantea muchas y muy peliagudas cuestiones

El sida ha puesto en jaque a los preceptos éticos desde los primeros días de la pandemia y sigue planteando angustiosos dilemas en todos los países, ya sean ricos o pobres. Los enfermos de sida y el resto de los infectados con el VIH, el virus del sida, se enfrentan en todo el mundo a varias formas de discriminación, mientras que los grandes costes y la larga duración del tratamiento necesario aumentan los problemas que todas las enfermedades graves plantean, aunque en menor grado. Las mayores batallas se están dando, concretamente, por asegurar el acceso a las tratamientos conocidos y por la forma ética de ensayar otros nuevos.

El miedo al contagio ha hecho a veces que a las personas infectadas no sólo las discrimine el público en general, sino hasta el personal médico y sanitario, lo cual ha originado denuncias y litigios en los tribunales desde los comienzos. Este mismo verano el Tribunal Supremo de los EE.UU. ha fallado a favor de una mujer infectada de VIH que pleiteaba contra un dentista por haberse negado éste a tratarla en su consultorio. La acusadora ha ganado la causa alegando discriminación y acogiéndose a la ley sobre ciudadanos americanos incapacitados. Esta sentencia podría modificar la interpretación legal de la incapacidad.

Pero el de la discriminación es sólo uno de los problemas éticos que el VIH plantea a la profesión médica y a la sociedad. La mejor terapia de que se dispone actualmente, en la que suelen combinarse tres fármacos que suprimen la replicación del virus, se ha de continuar indefinidamente y cuesta más de millón y medio de pesetas anuales. Aunque las administraciones públicas hayan establecido programas de asistencia para proporcionar los fármacos anti-VIH a gentes que, si no, no podrían conseguirlos, los fondos son limitados, de modo que en muchos países los pobres tienen menos acceso a los tratamientos que quienes cuentan con buenas pólizas de seguros.

El dinero no es el único obstáculo para una sanidad equitativa. El tratamiento a base de los tres fármacos supone tomar diariamente un mínimo de ocho píldoras anti-VIH (y en muchos casos bastantes más), ateniéndose a un plan a menudo complejo, además de otras medicinas que pueda necesitar el paciente. Los enfermos que no sigan con exactitud el plan prescrito corren el riesgo de que se intensifique en su cuerpo la proliferación de virus resistentes, con lo que se volverá más difícil cualquier tratamiento subsiguiente y aumentará el peligro de que se transmitan a otras personas estos virus resistentes. Esta es la razón de que los médicos desaconsejen a veces que se aplique la 'triple terapia' a pacientes que parece improbable que vayan a seguir el régimen en la forma debida.

Los avances terapéuticos de los dos últimos años suscitaron también cuestiones éticas, que ahora influyen en la forma de realizar las pruebas clínicas. Los médicos han aprendido que ningún fármaco anti-VIH funciona durante mucho tiempo por sí solo y que el uso de uno aislado promueve la resistencia contra él. Los especialistas en bioética médica estadounidenses están ya de acuerdo en que, por esta razón, no conviene hacer largas pruebas de cada fármaco por separado en los pacientes infectados de VIH. La necesidad de mantener rigurosas exigencias éticas ha aumentado así grandemente la complejidad y los costes de las nuevas pruebas.

No ha podido alcanzarse acuerdo ético en la enconada discusión sobre si está bien o no que los países ricos patrocinen y financien en los países pobres estudios que no sería correcto emprender en los primeros. La controversia estalló en 1997, cuando Peter Lurie y Sidney M. Wolfe, del Grupo de Investigación sobre Sanidad Pública, insistieron en denunciar que cierta investigación patrocinada en países subdesarrollados por los Centros pro Control y Prevención de la Enfermedad y por los Institutos Nacionales de la Salud, así como por el Programa de las Naciones Unidas sobre VIH/sida, estaba en realidad reñida con la ética y no era sino una explotación. Los estudios objeto de la denuncia trataban de averiguar, en varios países de Africa y de Asia, si un breve tratamiento con zidovudina (AZT) y otras terapias de bajo coste podrían impedir que las mujeres infectadas con VIH transmitiesen el virus a sus hijos.

Lurie y Wolfe se opusieron a esos estudios porque los investigadores ya sabían de antemano que la zidovudina reduce alrededor de dos tercios la transmisión del VIH si el fármaco se administra según un régimen conocido como ACTG 076 (sigla con la que se designó una prueba demostrativa de su validez),



EN COSTA DE MARFIL esta mujer, embarazada y portadora del virus del sida, considera la posibilidad de enrolarse en un estudio de tratamiento que pueda evitar la transmisión del virus a su hijo.

consistente en aplicarlo durante las últimas 26 semanas del embarazo, durante el parto (por goteo vía intravenosa) y al bebé durante las seis semanas siguientes a su nacimiento. Pero tal régimen, que cuesta unos 800 dólares, es demasiado caro para que su uso pueda difundirse en los países en vías de desarrollo.

Los discutidos estudios trataban de determinar si tratamientos mucho menos caros, de zidovudina o de otros medicamentos suministrados sólo durante las tres o cuatro últimas semanas del embarazo y que costarían no más de una décima parte del precio del protocolo ACTG 076, reducirían también la transmisión del VIH en una proporción que valiese la pena. Lurie y Wolfe se oponían a que se situase a algunas madres en un grupo de control, en el que no recibirían más que medicación simulada, que nada podía beneficiar a sus hijos. Argüían que, en vez de comparar un tratamiento abreviado de medicina con otro de placebo, debería haberse comparado el tratamiento breve con la totalidad del protocolo ACTG 076 para ver hasta qué punto eran equivalentes sus resultados.

Algunos defensores de las pruebas, como Harold E. Varmus, director del NIH, y David Satcher, cirujano general de los EE.UU., argumentaban que con la inclusión de placebos los investigadores podían averiguar más cosas, y más deprisa, sobre el valor de los tratamientos baratos para reducir la transmisión del virus. Los placebos son necesarios para calcular las tasas básicas de transmisión sin tratamiento, que varían en diferentes partes del mundo por razones bastante desconocidas.

Los defensores aseguraban además que los placebos ayudan a distinguir cualquier toxicidad importante que pudieran tener los medicamentos estudiados, aspecto éste no carente de importancia, puesto que la anemia, que es uno de los efectos secundarios conocidos de la zidovudina, es mucho más común en las poblaciones desnutridas que en los EE.UU. La opinión de Varmus y de muchos otros era que las pruebas no hacían daño a nadie, porque el placebo —es decir, el no tratamiento— era el régimen normal de la asistencia médica de los países en los que se realizaban los estudios.

Lurie, Wolfe y sus partidarios no quedaron satisfechos. Ninguna previsible toxicidad de la zidovudina ni de ningún otro tratamiento compensaría nunca las vidas de los bebés que podrían haberse salvado empleando el protocolo ACTG 076 en las comparaciones, mantenían ellos. Hubo quienes basaron sus críticas en la sospecha de que algunas de las personas que participaron en las pruebas quizá diesen su consentimiento sin haber sido debidamente informadas.

Wendy K. Mariner, de la Universidad de Boston, sostiene que para que unas pruebas como las que son objeto de esta disputa sean éticas se requiere que desde el comienzo se decida poner el tratamiento a disposición de las poblaciones locales, en caso de que se pruebe su eficacia. Y la verdad es que cuando se iniciaron estos discutidos estudios, no había ningún plan así. Yohana J. S. Mashalla, vicepresidenta de la Asociación Médica de Tanzania, critica la investigación tachándola de explotadora, por proponerse probar en países subdesarrollados el valor de tratamientos que puedan adoptarse luego en los desarrollados.

Sea o no ético, uno de los estudios patrocinados por los CDC (Centros para el Control de la Enfermedad) y realizado en Tailandia demostró, en febrero último, que el tratamiento con zidovudina durante tres o cuatro semanas reduce apreciablemente la transmisión del virus, aunque no tanto como lo hace el protocolo ACTG 076. Durante las semanas siguientes se empezó a suministrar el fármaco a mujeres que hasta entonces sólo habían recibido placebo en los estudios que se están realizando en diversas partes del mundo. El fabricante de la zidovudina, Glaxo Wellcome, anunció después que bajaría el precio para los países en vías de desarrollo. Pero en el mes de mayo no estaba claro aún cuántas de las mujeres que necesitaban la medicina lograrían obtenerla.

La cuestión de cuándo emplear placebos representa un "auténtico conflicto" entre el dar respuesta lo antes posible a las cuestiones decisivas y los intereses de los pacientes actuales, dice el especialista en bioética Arthur L. Caplan, de la Universidad de Pennsylvania. Pero, en su opinión, el investigador "les debe algo a sus sujetos, a saber, les debe las mejores opciones".

Un "instrumento infrautilizado", con el que se podría ofrecer mejores opciones a los pacientes, es, según Christopher R. Palmer, de la Universidad de Cambridge, una mayor aplicación de la estadística a los proyectos innovadores. Los estudios cuyos planes se basen en datos analizados con rigor matemático pueden, en algunos casos, proporcionar sólida información sobre la eficacia de un tratamiento, a la vez que no exponen a tantos pacientes a un tratamiento subóptimo como sucede habitualmente. Durante los estudios de este tipo se analiza continuamente la salud de los participantes. El cúmulo de indicios que se va obteniendo sobre los distintos tratamientos permite ir calibrando qué terapia convendrá aplicar al siguiente participante.

Los estudios de este tipo son por ahora infrecuentes, en parte porque a muchos de los técnicos en estadística médica les resulta poco familiar la especial matemática que implican. Pero en muchos casos son éticamente atractivos para estudios de gran amplitud sobre enfermedades graves.

Los dilemas que plantea la investigación del VIH se harán especialmente agudos cuando los productos candidatos a vacunas contra el VIH lleguen a estar disponibles para pruebas a gran escala. Como la 'triple terapia' es la regla asistencial en los países industrializados, hay quien sostiene que los investigadores tienen la obligación de aplicarla a todos los participantes en las pruebas de vacunas que resulten infectados. Pero a los fabricantes de vacunas les espanta la sola idea de lo que costaría aplicar la 'triple terapia' a los miles de personas participantes, aunque no fuese más que temporalmente.

El VIH seguirá pesando sobre la conciencia social mientras no estén al alcance de todo el mundo tratamientos y vacunas de poco coste y mucha eficacia. Y ese día solamente llegará mediante más investigación. Entre tanto, quienes acepten participar en las pruebas de un medicamento o de una vacuna nuevos no deberían firmar su compromiso sin que se les informe antes de que van a correr un riesgo, aunque quizá sea un riesgo razonable, puesto que podrán contribuir a que el futuro de la humanidad sea mejor.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ETHICAL ISSUES IN STUDIES IN THAILAND OF THE VERTICAL TRANSMISSION OF HIV. P. Phanuphak, en *New England Journal of Medicine*, vol. 338, n.º 12, págs. 834-835; 19 de marzo, 1998. *Ibid*., Correspondence, págs. 836-844.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

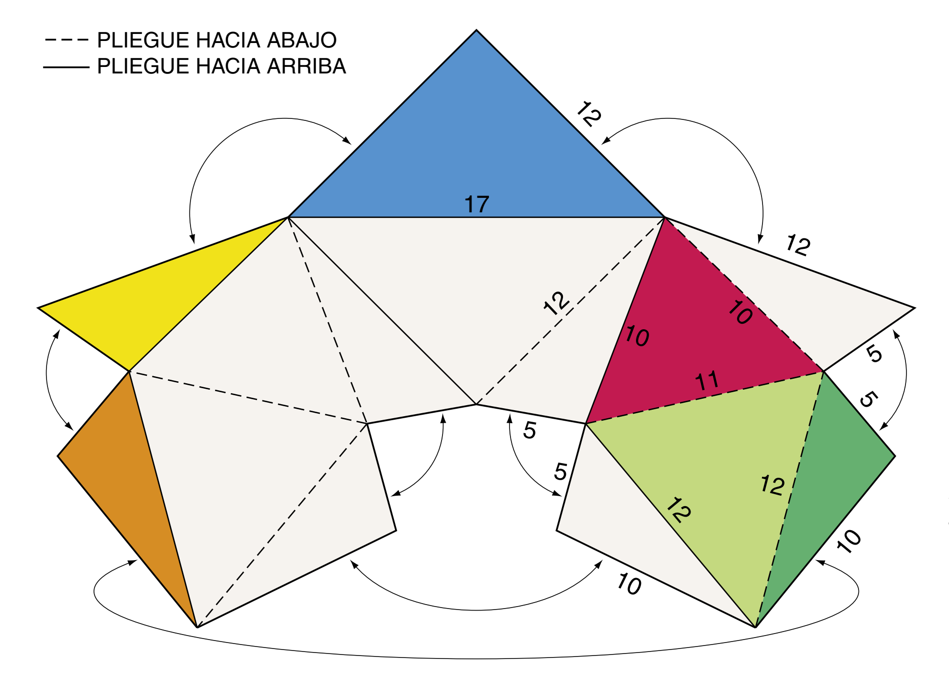
La conjetura del fuelle

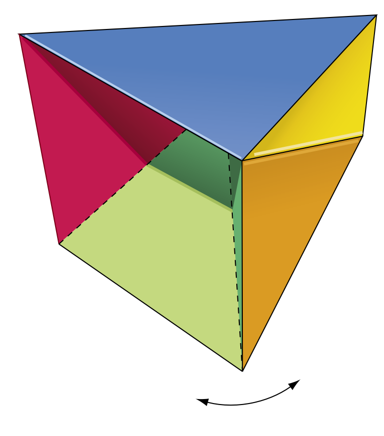
Cualquier carpintero aficionado que haya intentado construir una estantería sabe que los rectángulos no son rígidos. Si uno se apoya en un ángulo de una estantería rectangular que no esté bien construida, la estantería se inclinará hacia un lado, formando un paralelogramo, y lo más probable es que se venga abajo. Los triángulos, por el contrario, son rígidos: no se puede cambiar su forma sin modificar la longitud de al menos uno de sus lados. De hecho, el triángulo es el único polígono rígido. Una estantería que tenga cualquier otra forma poligonal —rectangular, pentagonal, hexagonal, etc.— ha de ser reforzada de alguna manera. Una posibilidad es añadir travesaños oblicuos, cuyo efecto es dividir el polígono en una configuración de triángulos rígidos.

Otra es adosarle un fondo plano, lo cual nos lleva a la tercera dimensión, donde todo resulta mucho más interesante. El problema de la rigidez de los poliedros ha tenido intrigados a los matemáticos durante casi dos siglos. Los poliedros son cuerpos espaciales cerrados, limitados por un número finito de caras poligonales que se cortan a lo largo de aristas rectilíneas. Hasta hace poco se daba por supuesto que todo poliedro de caras triangulares tenía que ser rígido. Pero esa presunción ha resultado falsa. Existen poliedros "flexibles", que pueden cambiar de forma sin que se deforme ninguna de sus caras triangulares. Y un trío de matemáticos logró demostrar hace justamente un año la conjetura del fuelle, postulada hace mucho tiempo, que afirma que el volumen de un poliedro flexible ha de permanecer invariable mientras cambia de forma. La demostración, inspirada en una fórmula de la Grecia clásica, ha abierto un nuevo dominio de investigación matemática.

Quien haya practicado la papiroflexia sabe que es posible construir muchas figuras flexibles: pajaritas que baten las alas, ranitas que estiran las ancas, y así por menudo. ¿No son éstos, acaso, ejemplos de poliedros flexibles? La respuesta es negativa. Cuando la ranita mueve las patas o la pajarita bate las alas, el papel se curva ligeramente. Lo mismo vale para un acordeón: el fuelle del instrumento puede expandirse y contraerse porque las facetas del fuelle se doblan y se estiran. Pero las caras de un poliedro flexible no se curvan absolutamente nada, ni siquiera una millonésima de milímetro. Cuando un poliedro se flexiona, lo único que puede cambiar son los ángulos en que se cortan las caras: es como si éstas tuvieran bisagras en las aristas. Todo lo demás es perfectamente rígido.

Este campo de estudio se remonta a 1813, cuando el matemático francés Augustin Louis Cauchy demostró que un poliedro convexo —un poliedro que carezca de cavidades o entrantes— no es flexible. Pero ¿qué ocurre si hay cavidades? Un ingeniero francés, Raoul Bricard, descubrió que los poliedros no convexos podrían realmente ser flexibles si se permitiera que sus caras pasasen unas a través de otras. Es evidente que tal cosa es imposible para cualquier objeto real del mundo físico. Uno puede hacerse una idea





Se puede construir un poliedro flexible de cartulina ampliando el diagrama (izquierda). *Se realizan los pliegues indicados y luego se juntan los bordes. Una vez terminado, tendría que poder moverse como se indica* (arriba)

de las figuras de Bricard, empero, si se retiran las caras del poliedro y se reemplazan las aristas por un armazón de varillas rígidas.

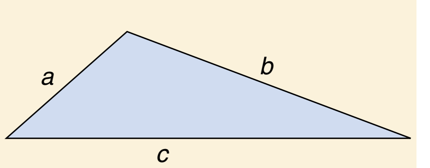
Robert Connelly, que en la actualidad es jefe del departamento de matemáticas de la Universidad Cornell, modificó el poliedro no convexo de Bricard en los años setenta de modo tal que permaneciera flexible, pero sin que sus caras tuvieran que pasar unas a través de otras. La construcción de Connelly fue simplificada por Klaus Steffen, de la Universidad de Düsseldorf, quien descubrió un poliedro flexible de nueve vértices y 14 caras triangulares (*véase la figura*). El trabajo de construir un ejemplar de este poliedro con cartulina fina y ver cómo se cimbrea es entretenido. Que se sepa, es el más sencillo de los posibles poliedros flexibles, aunque sería muy difícil demostrar tal afirmación.

Los investigadores de estos poliedros no tardaron en advertir que algunas caras se acercaban y otras se separaban más al producirse la flexión. Parecía como si el volumen total de los poliedros no variase durante su movimiento. Dennis Sullivan, de la Universidad de la Ciudad de Nueva York, verificó experimentalmente esta hipótesis, para lo que perforó un diminuto agujero en un poliedro flexible y llenó de humo el modelo. Al mover el poliedro así relleno, no exhaló humo por el orificio. Este burdo experimento indicó —aunque, obviamente, no lo demostrase— que el volumen del modelo permanecía constante. La proposición dio en ser conocida por "conjetura del fuelle" porque entrañaba que un poliedro flexible no funciona como un fuelle, ya que éstos modifican su volumen y expulsan aire o lo aspiran al cambiar de forma.

La primera característica interesante de la conjetura del fuelle es que su versión análoga en dos dimensiones es falsa. Cuando un polígono flexible, como es un rectángulo, se distorsiona y forma un paralelogramo, disminuye el área que encierra. Está claro que el espacio tridimensional tiene un algo de insólito que hace imposibles los fuelles poligonales. Pero ¿en qué consiste?

Para resolver el misterio, Connelly y otros dos matemáticos —Idzhad Sabitov, de la Universidad del Estado en Moscú, y Anke Walz, de Cornell— centraron su atención en una clásica fórmula del área de un triángulo. Algunos eruditos creen que tal fórmula fue deducida por Arquímedes, pero normalmente es atribuida a Herón de Alejandría, que dejó una demostración escrita. Herón era un matemático griego que vivió entre el año 100 a. de C. y el 100 d. de C. Su fórmula, que vemos en el recuadro superior, establece la relación entre el área (x) de un triángulo y las longitudes de los tres lados (a, b, c). Observemos que se trata de una ecuación polinómica: sus términos son potencias enteras de x, a, b y c.





Supongamos que un triángulo tiene lados a, b, c y área x. Sea s su semiperímetro.

entonces $s = (a + b + c)/2$

$x = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$

Elevando al cuadrado la ecuación anterior, resulta

$$16x^2+a^4+b^4+c^4-2a^2b^2-2a^2c^2-2b^2c^2=0$$

A Sabitov se le ocurrió una idea original: la posibilidad de que existiera una ecuación polinómica similar para cualquier poliedro, una fórmula que relacionase el volumen del cuerpo con las longitudes de sus aristas. Tal ecuación constituiría un descubrimiento muy notable. Existen varias fórmulas muy conocidas para poliedros especiales, como los cubos o los ortoedros, cuyo volumen es el producto de las longitudes de su largo, ancho, y alto, y otra, para los tetraedros, poliedros de cuatro caras triangulares, que se parece un poco a la fórmula de Herón. Pero nadie había deducido jamás una fórmula general, que permitiera obtener el volumen de un poliedro cualquiera. ¿Sería posible que a los matemáticos más brillantes del pasado no se les hubiera ocurrido una idea tan maravillosa? Parecía inverosímil.

Supongamos, empero, que tal fórmula existiese. En tal caso, la conjetura del fuelle tendría que ser verdadera, porque el volumen del poliedro dependería exclusivamente de las longitudes de sus aristas. En la flexión del poliedro no varía la longitud de sus aristas, por lo que el volumen tampoco podría variar. Esta clase de razonamiento presenta un problema, sin embargo: una ecuación polinómica puede tener varias soluciones distintas, por lo que el volumen del poliedro podría saltar de una solución a otra. Pero tal salto no puede acontecer en el mundo físico: si la flexión se realiza gradualmente, el volumen no puede saltar bruscamente de un valor a otro. Por consiguiente, ha de permanecer constante.

Los matemáticos empezaron su demostración modificando la fórmula del volumen de un tetraedro, que es parecida a la fórmula de Herón, aunque más compleja. Exactamente igual que puede dividirse un poliedro en triángulos, se le puede descomponer en tetraedros. El volumen del poliedro es la suma de los volúmenes de sus tetraedros componentes. Este método, por sí solo, no resuelve el problema: desemboca en una fórmula en la que intervienen todas las aristas de todas las piezas tetraédricas, muchas de las cuales no son aristas del poliedro original. Lo que sí son, en cambio, es rectas diagonales que van desde uno hasta otro vértice del poliedro, por lo que sus longitudes pueden variar durante la flexión. Los matemáticos tuvieron que "dar un buen masaje" algebraico a la fórmula para poder librarse de las componentes variables.

El proceso fue complejo y poco elegante. En el caso de un octaedro, cuerpo que posee ocho caras triangulares, el procedimiento de masaje acabó produciendo una ecuación polinómica en la que el volumen aparecía elevado a la 16-ésima potencia. Otros poliedros más complejos exigían potencias todavía mayores. No obstante, en 1996 Sabitov ideó un algoritmo para hallar una fórmula del volumen de un poliedro cualquiera. El equipo compuesto por Connelly, Sabitov y Walz había logrado simplificar mucho el algoritmo hacia 1997.

Todavía no se comprende plenamente la razón de que existan tales ecuaciones para todos los poliedros. No hay nada equivalente en dos dimensiones, excepto la fórmula de Herón, que sólo es válida para triángulos. Connelly y Walz creen saber cómo demostrar una versión tetradimensional de la conjetura del fuelle, pero en el caso de cinco o más dimensiones el problema está completamente abierto. Resulta fascinante que un experimento sencillo de plegado de cartulina pueda conducir hasta un descubrimiento matemático, maravilloso y totalmente inesperado.

NEXOS

James Burke

Cuestiones de peso

Siempre se ven las cosas más claras a toro pasado. Podemos, pues, preguntarnos por qué Johannes Kepler (un astrónomo alemán que padecía la desgracia de tener visión múltiple) no supo dar un apelativo más científico a la misteriosa atracción actuante sobre los cuerpos celestes cuando publicó en 1609 sus descubrimientos sobre lo que mantenía a los planetas en órbita alrededor del Sol. Lo llamó la Fuerza del Espíritu Santo.

Un par de años más tarde, al encontrarse con el poeta inglés John Donne, Kepler le entregó un ejemplar del libro para que se lo hiciera llegar al rey de Inglaterra. Lo afirma Izaak Walton, un preboste que escribió la biografía de Donne. Fue él quien lanzó ideas completamente nuevas sobre la pesca en el libro titulado *El pescador completo: el recreo del hombre contemplativo*, aparecido en 1653 y que diríase dedicado a todos los clérigos ingleses que habían quedado en paro durante la revolución puritana. Para ser exactos, la obra no es enteramente suya. El capítulo de la pesca con mosca lo escribió un literato rico y compañero de libaciones llamado Charles Cotton, quien también se defendía en el terreno de la traducción. Su versión al inglés de los *Ensayos* de Montaigne, realizada en 1685, está considerada un clásico.

El pensador francés, por su parte, estuvo siempre a punto de meterse en líos por mor de su estridente escepticismo ante cualquier forma de autoridad, lo que resultaba peligroso en una época en la que cualquier forma de autoridad todavía llevaba consigo la facultad de aplicar el potro. A pesar de todo, Montaigne (que esculpió en las vigas del techo de su estudio "lo único cierto es que todo es incierto") supo llevarle siempre una cierta delantera al gendarme teológico. En 1580 realizó un viaje a Florencia y quedó maravillado ante los jardines del Palacio Médici de Pratolino, donde le fue dado contemplar lo más avanzado en juguetes técnicos para infantes (léase príncipes renacentistas). En los jardines había paisajes artificiales dotados de movimiento, órganos hidráulicos, figuras mecánicas, cascadas musicales y otras maravillas de tenor parecido, creado todo ello por el talento de Bernardo Buontalenti, arquitecto, ingeniero y habilidoso donde los hubiera. Buontalenti no se arredraba ante nada, haciendo extravagantes incursiones teatrales (presentó una obra en 1585 en los Uffizi para los Médici), realizando escenografías y espectáculos musicales bufos de todo tipo, siempre que sus principescos patrones tuviesen algo que celebrar. Hacía todo esto cuando no tenía que ocuparse de organizar el abastecimiento de agua de la Toscana.



Otro que contribuyó a aligerar la bolsa de los Médici fue Sir Robert Dudley, un dudoso aventurero inglés que había huido de su país junto con su amante, abandonando a su segunda esposa y a sus numerosas hijas. Según alegaba, le correspondía el título de conde de Warwick, que le era negado por culpa de disputas familiares y de acusaciones de ilegitimidad. En Italia recuperó tierras pantanosas entre Pisa y el mar, construyó canales, prácticamente inventó la ciudad de Livorno e hizo que la marina de los Médici conociese el arte inglés de construir barcos. Dudley publicó en 1647 *Sobre el secreto del mar*, la primera colección completa de mapas levantados con la proyección de Mercator. Los mejores cartógrafos de aquel tiempo eran holandeses, sobre todo la familia Blaeu. Padre e hijos eran los cartógrafos de la Compañía Holandesa de las Indias Orientales, cuyo mayor interés se centraba en explorar las supuestamente fabulosas riquezas de Extremo Oriente y traerse todas las posibles. Willem Janszoon Blaeu había establecido un negocio familiar de impresión en Amsterdam hacia 1602 y actualizaba sus mapas mediante el monopolio de la información que obtenía de los capitanes nada más poner pie en tierra.

Blaeu *père* empezó a trabajar en las oficinas de una compañía de arenques (donde se despertó su interés por los asuntos marinos). Fue luego ayudante de Tycho Brahe, un airado astrónomo danés que lucía una prótesis nasal metálica. Cierta noche de 1572 en que se encaminaba a casa tras cerrar el observatorio, Tycho vio lo imposible: una nueva estrella en un cielo que se suponía inmutable. La primera persona a la que le mostró la nova y no se rió de él fue su amigo el embajador francés Charles de Dancey, *bon vivant* y bellísima persona a un tiempo. De lo último daba fe su reciente viaje a la prisión de Malmö para interceder, nada menos que ante el rey, por un prisionero, uno de los mayores rufianes de la época.

James Hepburn, cuarto conde de Bothwell, era un aventurero al que la suerte le había vuelto la espalda. Se embarcó en Escocia rumbo a Escandinavia, pero el infortunio le hizo recalar en Bergen, cuyo duque

no le creyó por más que juró ser un caballero escocés en busca de trabajo. Y es que daba la casualidad de que este mandatario local tenía una parienta a la que Bothwell había ultrajado unos años antes; un mal hábito que tenía muy arraigado. Porque, a decir verdad, Bothwell había huido de Escocia dejando empantanada a su esposa cuando sospechó que iban a echarle mano por complicidad en el asesinato del anterior marido de aquélla. Una pequeñez, si no fuera porque la señora Bothwell también era conocida como Mary, reina de los escoceses.

Pero bastantes líos tenía ya Mary, legítima aspirante al trono de Inglaterra, aunque estuviese ocupado por Isabel. Suele ocurrir que los conspiradores incapaces de mantener la cabeza fría terminen perdiéndola y Mary no fue una excepción. Isabel tenía también otras cosas en que pensar, como en los problemas de Sir Francis Drake y compañía. Comprobaron éstos con estupor que, tras cruzar el Atlántico, la aguja de la brújula no apuntaba a la estrella polar. Las investigaciones de gabinete de crisis que realizó William Gilbert, médico y asesor científico personal de su majestad, le convencieron de que la Tierra no era sino un gigantesco imán con un polo norte que atraía hacia sí la aguja de la brújula, un punto geográfico distinto del polo norte celeste de la rotación terrestre.

El descubrimiento dio alas a una legión de afamados experimentadores. Digno de mención es el alcalde alemán Otto von Guericke, quien en 1650 construyó un modelo a escala de la Tierra con azufre, lo frotó vigorosamente y le acercó varias agujas para ver hacia dónde apuntaban. (Fue aquélla una auténtica edad de oro para la inventiva.) Durante una sesión de frotamiento, anota Guericke a pie de página, la bola produjo un estruendo acompañado de un chispazo. Se trataba de electricidad. De la noche a la mañana todo el mundo se puso a frotar, Francis Hauksbee incluido.

Hauksbee presentó en 1706 ante la Regia Sociedad de Londres un generador eléctrico sorprendente: un pequeño globo de vidrio en el que había hecho el vacío y que estaba montado sobre un huso. Si se hacía girar la esfera a gran velocidad manteniendo la mano sobre el cristal, se producía en su interior una luz púrpura; las hebras de hilo que hubiera en los alrededores se movían atraídas por la esfera. Pasando a cosas más finas, Hauksbee descubrió que, si se introducían dos tubos finos de vidrio en un líquido, el nivel subía más en el tubo más delgado. Hauksbee sospechó que algo sucedía entre el líquido y las paredes del tubo, por lo que se dirigió al especialista en temas de "atracción": Isaac Newton.

Newton explicaba la acción capilar en 1717 y la atribuía a la tensión superficial. Para entonces era ya el hombre más famoso de todo el universo al haber aclarado el misterio de la kepleriana fuerza del Espíritu Santo, bautizándola con un nombre que también le cuadraba a él: gravedad.

Pero basta ya de cuestiones pesadas.

Estado sólido

Manual consistente

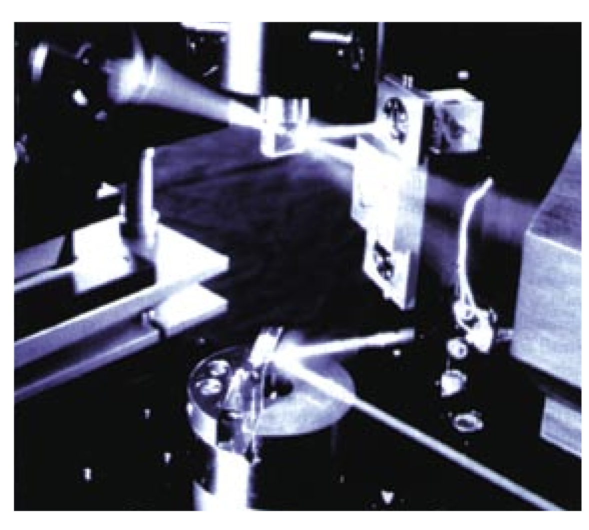
INTRODUCTORY SOLID STATE PHYSICS, por H. P. Myers. Taylor and Francis; Londres, 1997.

El libro surge como un loable intento de ser un texto con el contenido y nivel adecuados (es decir, ni recargado de materia o dificultad, ni insuficiente por lo elemental) para un curso anual de física del estado sólido en la licenciatura de física o ingenierías que requieran el conocimiento de esta materia. De hecho el autor tiene en mente un tipo de estudiantes que no recibirán otros cursos de estado sólido avanzado, cursos que, en un plan de estudios racional, debieran posponerse a estudios de posgrado (tercer ciclo).

Señala H. P. Myers, con buen criterio, que para estudiar física del estado sólido el estudiante debe tener una buena base en física clásica, así como en física cuántica, física atómica y física estadística. Choca esto con el hecho de que la física atómica aparece relegada a la categoría de asignatura optativa (no obligatoria) en el plan de estudios de la licenciatura de física vigente en alguna universidad española. ¡Evidentemente, algunos colegas cercanos ven la física de otra manera!

El libro de Myers se concentra en los sólidos cristalinos, en los cuales los átomos están apilados de una manera ordenada regular. Paradójicamente, lo que coloquialmente llamamos cristal (el de las ventanas) no es un sólido cristalino sino un vidrio amorfo, es decir, un líquido congelado. Los distintos capítulos del libro cubren los temas usuales que también se encuentran en otros libros de texto, pero encuentro algunos puntos originales que merece la pena destacar. El capítulo 3, que trata sobre la teoría y la práctica de la determinación de estructuras cristalinas por difracción de rayos X, neutrones y electrones, contiene dos temas novedosos. Uno de ellos es la aplicación de los métodos de difracción a sistemas no periódicos, como materiales líquidos y amorfos, y también a materiales cuasiperiódicos con estructura icosaédrica local. El segundo se refiere a pequeños agregados atómicos, que representan la primera etapa, bastante compleja, del crecimiento de la materia condensada que dará lugar al sólido.

Existen amplios indicios de la formación de estructuras icosaédricas en agregados atómicos formados por los gases inertes (neón, argón, etc.), o por ciertos elementos metálicos. Si bien, debido a las tensiones elásticas que se acumulan al crecer el número de átomos en un agregado icosaédrico, debe producirse una transición a la estructura usual del sólido cristalino macroscópico, el tamaño del agregado para el que se produce esta transición no se conoce en absoluto, y mucho menos el mecanismo de la transición.



Almacenamiento holográfico de datos: intersección del haz objeto y el haz láser en un cristal de $LiNbO_3$ dopado

La molécula C_{60}, formada por 60 átomos de carbono, también tiene la estructura de un icosaedro (truncado) y superagregados formados por unas decenas de moléculas C_{60} también forman estructuras icosaédricas. No sorprende, pues, que esta ubicuidad de la estructura icosaédrica en agregados de unos pocos átomos se refleje en la formación de cuasicristales con estructura icosaédrica local en ciertas aleaciones metálicas.

Otro tipo peculiar de pequeños agregados atómicos que presenta Myers, los formados por elementos alcalinos (sodio, potasio, etc.), constituyen la realización práctica más sencilla del conocido problema de un pozo esférico de potencial de profundidad finita y paredes bastante abruptas, que se resuelve en todos los libros de mecánica cuántica. Siguiendo la evolución de los niveles electrónicos al aumentar el tamaño del agregado se puede entender la formación de las bandas de niveles electrónicos en el sólido. Por otra parte, la rápida miniaturización de los componentes electrónicos de las computadoras está produciendo el efecto de que las “nanoestructuras”, en especial en el campo de los semiconductores, formen una parte cada vez más importante de la física del estado sólido.

Los sólidos cristalinos reales no son perfectos. Contienen imperfecciones y defectos, tanto puntuales (vacantes e intersticiales) como extendidos (dislocaciones, por ejemplo), que controlan algunas de las propiedades mecánicas de interés tecnológico. En el libro de Myers este capítulo aparece antes que en otros, proporcionando enseguida una idea realista de los sólidos, lo que considero una elección acertada.

Cuatro capítulos dan una descripción detallada de la estructura electrónica de los metales. En estos capítulos, después de discutir los principios generales, por ejemplo la teoría de bandas electrónicas, se aplican éstos a la descripción de las propiedades de sistemas reales. Es también interesante la discusión de las aleaciones metálicas sustitucionales, en las que el potencial ya no es estrictamente periódico. Aunque breve, se hace referencia a los superconductores de alta temperatura crítica en el capítulo dedicado a la superconductividad. El libro termina con dos capítulos, breves también, bastante originales. Uno dedicado a la física de superficies y el otro dedicado a las implicaciones de efectos del núcleo atómico en la física de sólidos, siendo los más conocidos la resonancia magnética nuclear y la espectroscopía Mössbauer.

JULIO A. ALONSO

Zoología

Cuestiones abiertas

Les Animaux Exotiques dans les Relations Internationales: Espèces, Fonctions, Significations. Dirigido por Liliane Bodson; Université de Liège; Lieja, 1998. **L´Histoire de la Nature des Oyseaux**. Edición preparada por Philippe Glardon. Droz; Ginebra, 1997.

Molecular Zoology: Advances, Strategies, and Protocols. Dirigido por Joan D. Ferraris y Stephen R. Palumbi. Wiley-Liss; Nueva York, 1996. **Principles of Animal Design**. Dirigido por Ewald R. Weibel, C. Richard Taylor y Lina Bolis. Cambridge University Press; Cambridge, 1998. **Optima for Animals**, por R. McNeill Alexander. Princeton University Press; Princeton, 1996.

Brute Science. Dilemmas of Animal Experimentation, por Hugh LaFollete y Nill Shanks. Routledge; Londres, 1996. **Taking Animals Seriously. Mental Life and Moral Status**, por David DeGrazia. Cambridge University Press; Cambridge, 1996.

Motor de la ciencia es la curiosidad, despertada a menudo por los fenómenos insólitos. Es ésa una vieja idea que recibe confirmación en el volumen nono de los coloquios de historia de los conocimientos zoológicos dedicado a *Les animaux exotiques dans les relations internationales: espèces, fonctions, significations*.

Desde tiempos remotos, los animales han formado parte de los presentes ofrecidos a un soberano o han sido objeto de intercambio. En anales, relieves o frescos de Mesopotamia y Egipto vemos desfilar en tributo de vasallaje elefantes, monos, dromedarios, jirafas y otros animales salvajes o “exóticos”. Entre los dones traídos a la corte de Mari, mezclados con oro y piedras preciosas, se cuentan un caballo blanco y una acémila albina. Llegada la época de El-Almarna (entre el siglo XVI y el XII a.C.), las escenas y relatos de caza apuntan ya hacia las grandes rapaces, sin dejar de vanagloriarse del abatimiento de leones y avestruces del desierto. Assur-nasirpal se trae de Fenicia rebaños de uros, elefantes, leones, avestruces, monos, onagros, gacelas, osos y dos o tres clases de felinos.

Si pasamos por alto la hermosa pieza con que un pescador de Samos obsequia al tirano Polícrates (que reinó del 535 al 522 a.C.), no hay noticias de ese tipo de regalos entre los griegos hasta Alejandro Magno (333-323 a.C.). Lo que no obsta para que sean jónicas las primeras fuentes sistemáticas sobre animales y que en ese solar se aclimataran muchas especies exóticas. Para resaltar el origen foráneo, los griegos agregaban un patronímico. El “faisán” era el pájaro de Fase, río de la Cólquida; gallo y pavo eran “pájaros de Persia”.

El silencio casi absoluto de la jurisprudencia romana en torno a los animales exóticos contrasta con el lugar que éstos ocuparon durante la República y el Imperio. Conocemos su papel central en la diversión y el circo. Pero sólo Marciano los eleva a categoría jurídica. En el apartado sobre impuestos, el *Digesto* somete a gravamen eunucos de la India, leones, panteras y leopardos. Pero la *lex Aquilia* preveía una pena pecuniaria precisa para quien hubiera matado un esclavo (hombre o mujer) o un cuadrúpedo perteneciente a otros. No puede hablarse en rigor de derecho de los animales.

Aunque los jurisconsultos romanos consideraban los animales entre las *res* (cosas) no eran insensibles a su peculiaridad. En un texto de Ulpiano, fundamental para el derecho natural, dice que éste es el que la naturaleza ha impreso en todos los animales, no exclusivo por tanto del género humano. Por eso el estado propio del animal es la libertad; si un animal se escapa, torna a su naturaleza. Los grandes animales domésticos (*res mancipi*) pertenecen al corazón más noble de la propiedad romana, junto con los animales de cría (*pecudes*).

Los textos japoneses más antiguos que subsisten, *Kojiki* y *Nihonshoki*, recuperan la historia de su pueblo desde los orígenes, donde se mezclan mitos, leyendas, epopeyas de dioses y emperadores. El primero se compiló en el 712. Aparecen en él más de 411 referencias a animales, 60 de las cuales remiten a donaciones o tributos enviados al emperador desde el exterior y desde las provincias. Se valoraban en particular los buenos sementales para cruzarlos con razas autóctonas. Había animales exóticos: camellos, pavos reales y loros. Más que un afán de poseer ejemplares raros les guiaba el deseo de adquirir nuevos conocimientos y técnicas, en particular las ligadas a la caza o la guerra. De los holandeses, sus únicos interlocutores en los siglos de enclaustramiento, los japoneses aprendieron la medicina veterinaria.

El intercambio de animales exóticos entre Asia y Europa se había intensificado en los siglos descubridores. El rinoceronte que llegó al Tajo en 1515 fue un presente ofrecido a Albuquerque, gobernador de la India portuguesa, por el sultán Muzafar II, señor del reino de Camboya o Gujarat. Cada vez más numerosos y mejor descritos —interesaban sus cuernos, defensas, pieles y caparazones—, los animales exóticos entraron muy pronto en las enciclopedias zoológicas del Renacimiento y, de forma más sistemática, en las obras especializadas. Los *Pteropus*, el *Raphus cucullatus* o el armadillo (*Tolypeutes matacus*) se cuentan entre los que enriquecieron la historia natural de la segunda mitad del siglo XVI y comienzos del XVII.

Pocos textos, sin embargo, ejercieron la influencia de *L´histoire de la nature des oyseaux*, cuya edición facsímil de la publicada en 1555 introduce Philippe Glardon. Su autor, Pierre Belon, es un personaje controvertido. Mancebo de botica, médico en su madurez, se considera a sí mismo “filósofo”. Lo es de la naturaleza orgánica, con tratados sobre peces y árboles resiníferos. Quizá resulte desmesurado, sin embargo, atribuirle la paternidad de la nomenclatura binaria y de la anatomía comparada.

Nació en 1517. Murió de forma violenta en 1565. Se le acusó de impostura y plagio en *L´histoire*. No era la peor calumnia en un siglo en que la liza intelectual no se detenía en el ataque *ad hominem* (a su origen, religión o físico). A Belon se le cuestiona su conocimiento del griego y latín, pese a sembrar de citas clásicas la descripción de las aves. Se decía que se había apropiado de las notas manuscritas de Pierre Gilles, a la muerte de éste en 1555, para publicarlas con su nombre.

L´histoire, ilustrada con 159 grabados en madera, consta de siete libros, el primero de los cuales constituye una introducción general a las Aves, cuya descripción abarca no sólo la anatomía y hábito, sino también su uso en medicina. Escalona el grupo en una clasificación cuasiborgiana: rapaces, las que viven junto a los ríos y palmípedas, las que medran cerca de las aguas sin ser palmípedas, las correderas que anidan en el suelo, las que habitan en todos los medios y

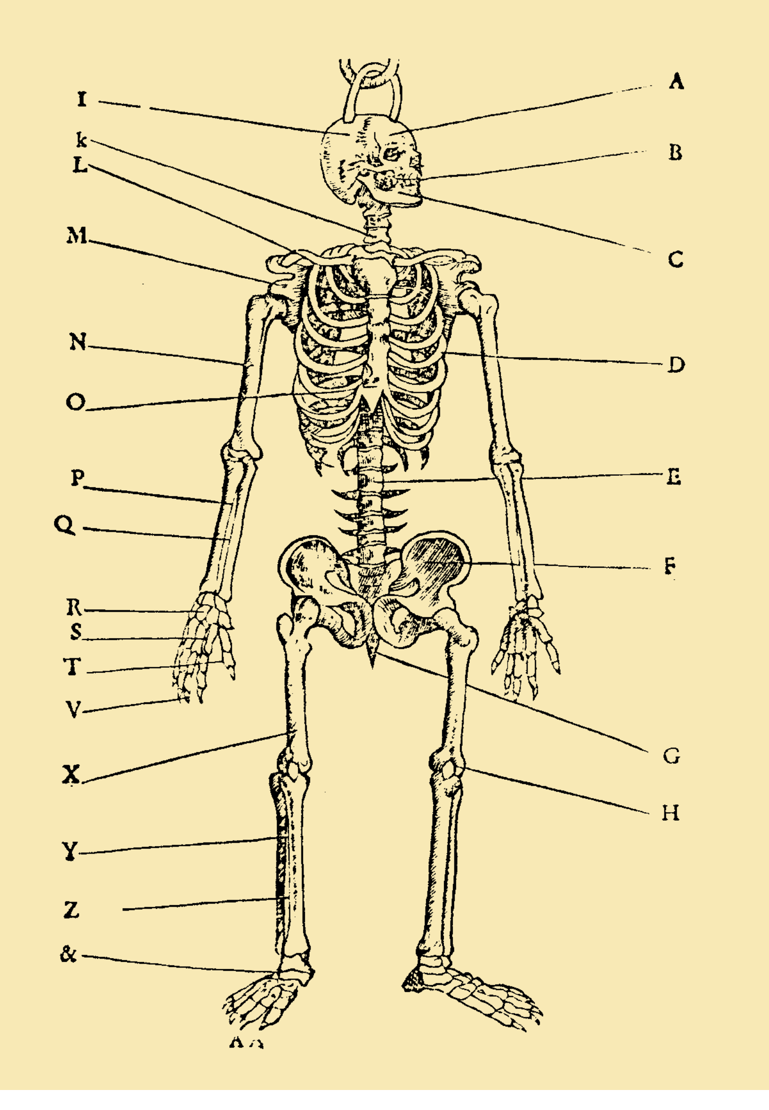
las insectívoras de envergadura paseriforme. Halla en la *Historia animalium* de Aristóteles y la *Historia naturalis* de Plinio sus principales fuentes de inspiración, completadas con las obras médicas de Galeno, las *Aves* de Aristófanes, los *Epigramas* de Marcial, las *Metamorfosis* de Ovidio o los tratados agrícolas de Varrón y Columela.

No emplea los términos “género” y “especie” de un modo coherente y preciso. Ese vicio, por lo demás, lleva siglos de pertinacia. La palabra “género” designa desde un grupo ceñido, el “género de los buitres”, hasta otro amplísimo “género de las Aves”. Más ajustado a la definición biológica es el uso de “especie”, aunque a veces se confunde con género. En la descripción de géneros y especies, el naturalista del siglo XVI recurre a menudo a la comparación, una suerte de patrón de referencia, con el que medir envergadura, talla, morfología, color, costumbres, etcétera. Cumplen ese menester el águila real, el milano real, el pato, el gallo, la perdiz, la alondra, el mirlo, el carpintero o el ruiseñor.

Esos y otros viejos problemas se prolongarán con nuevos formatos. La homología entre animales sin parentesco próximo dio lugar en el siglo XIX a un resonado debate entre Georges Cuvier y Geoffroy Saint-Hilaire. Mientras éste no dudaba en comparar organismos con planes muy distintos (moluscos y vertebrados por ejemplo), Cuvier creía que las comparaciones sólo se admitían entre organismos estrechamente emparentados (verbigracia, entre aves y mamíferos). Polémica abierta durante más de 150 años, empieza a cerrarse con el dominio de las pautas de expresión de los genes de desarrollo.

En efecto, la biología molecular y la biomecánica han obligado a la zoología a salir de su letargo de descripción y sistemática. La biología molecular (repárese en *Molecular Zoology: Advances, Strategies, and Protocols*) remueve los componentes últimos, en tanto que la biomecánica (léanse *Principles of Animal Design* y *Optima for animals*) afecta al organismo entero.

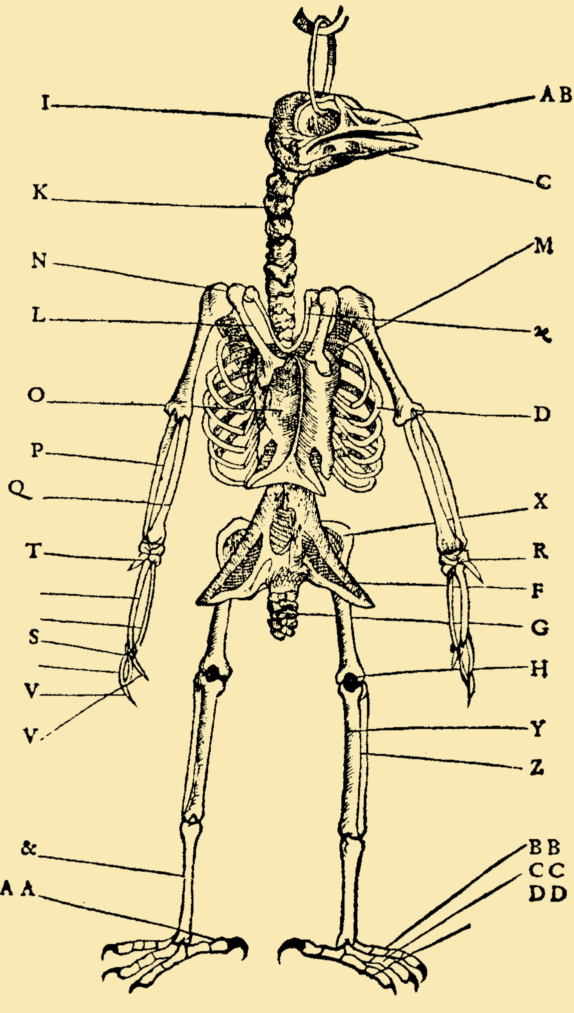
Los zoólogos disponen ya de bases de datos informatizadas sobre estructura y función de secuencias génicas y otras. Hay bancos que ofrecen secuencias de proteínas (SwissProt y PIR) o están especializados en enzimas de restricción (REBASE). Almacenan genes o segmentos de ADN los norteamericanos GenBank y GSDB, el DDBJ nipón y EMBL europeo. El



Comparación entre la anatomía ósea del hombre y de las aves, según Pierre Belon

número de secuencias de ADN recogidas en GenBank, de escasos miles a mediados de los ochenta, contaba con unas 500.000 a finales de 1995.

Para manejar esos datos y construir filogenias, tienen a su alcance los zoólogos unos potentes medios estadísticos. Goza de merecido favor la autodocimancia paramétrica (*parametric boostrap*), que crea réplicas mediante simulaciones numéricas. En esta estrategia, aceptado un modelo de evolución, se estiman los parámetros del mismo a partir de la topología del árbol, longitud de las ramas y sesgo transición-transversión; luego, se simulan nuevas matrices de caracteres del mismo tamaño, para analizar, por fin, las matrices de caracteres replicados.



DES OYSEAVX, PAR P. BELON. 41

La comparaiſon du ſuſdit portraict des os humains monſtre combien ceſtuy cy qui eſt d'vn oyſeau, en eſt prochain.

Portraict des os de l'oyſeau.

A B Les Oyſeaux n'ont dents ne leures, mais ont le bec tranchant fort ou foible, plus ou moins ſelon l'affaire qu'ils ont eu à mettre en pieces ce dont ils viuent.

M Deux pallerons longs & eſtroicts, vn en chaſcun coſté.

ꝛ L'os qu'on nommé la Lunette ou Fourchette n'eſt trouué en aucun autre animal, hors mis en l'oyſeau.

D Six coſtes, attachees au coffre de l'eſtomach par deuãt, & aux ſix vertebres du dos par derriere.

F Les deux os des hanches ſont longs, car il n'y a aucunes vertebres au deſſoubs des coſtes.

G Six oſſelets au cropion.

H La rouelle du genoil.

I Les ſutures du teſt n'apparoiſſent gueres ſinon qu'il ſoit boully.

k Douze vertebres au col, & ſix au dos.

d iii

Armados con una batería de marcadores genéticos, los zoólogos van reconstruyendo relaciones de parentesco y descendencia. Aunque no han encontrado el marcador universal, válido para todo lugar y tiempo, han afilado una óptima herramienta para definir la estructura de la población y fijar las genealogías: los marcadores de ADN polimórficos y aleatoriamente amplificados (RAPD). Los marcadores RAPD constan de fragmentos cortos de ADN, multiplicados vía reacción en cadena de la polimerasa.

En esa línea se han empleado secuencias de ADN mitocondrial de una parte del gen de la citocromooxidasa I para resaltar la escala espacial de diferenciación genética en cuatro especies congéneres del erizo de mar *Echinometra*. En efecto, se daba por sentado que el flujo génico entre poblaciones frenaba las posibilidades de divergencia e inhibía la formación de especies. La paleontología marina nos descubre, por contra, un Pleistoceno de activa especiación. Pese a un estadio larvario planctónico que perdura de 6 a 8 semanas, *Echinometra* spp. mantiene una sólida estructura genética a lo largo del Indo-Pacífico. La combinación de haplotipos y frecuencias significativas de ADN mitocondrial sugiere un período reciente de colonización seguida por diferenciación genética local: una acción dual del flujo génico episódico y de deriva genética local durante períodos de bajo intercambio larvario.

Se tiende a asociar las invasiones marinas con especies de porte grande, muy llamativas. Parece, sin embargo, mucho más probable, que la mayoría de las invasiones sean crípticas. Las especies invasoras podrían semejarse a las endémicas. Las herramientas de la sistemática molecular son las idóneas para abordar esos problemas. Añádanse a las mencionadas los microsatélites de ADN (repeticiones en tándem de motivos simples, como ATT), que forman una clase de marcadores genéticos codominante, neutra y de un solo locus, cuyo polimorfismo permite calcular el parentesco.

Pasemos de las secuencias génicas al fenotipo. La estructura de los animales, sus movimientos, su comportamiento y su historia vital, todos se han conformado en el curso de la evolución. La selección ha privilegiado además la optimización, según muestran *Optima for Animals* y *Principles of Animal Design*.

Por mor de la optimización buscamos la forma más adecuada de construir un objeto. ¿Cuál es la resistencia ideal de un hueso? Un hueso demasiado frágil se romperá muy pronto; uno demasiado fuerte sería costosísimo. ¿Debe un ave cazar sólo gusanos muy jugosos o debe lanzarse sobre el primero que encuentre? La teoría de la optimización es una rama de la matemática que se ocupa del descubrimiento de las estructuras y conductas que son las mejores. Se trata, por tanto, de una herramienta utilísima para descubrir por qué los animales han procedido en un camino determinado.

El tendero ideal compra el artículo más barato entre todos los de igual cualidad o el mejor entre los del mismo precio. De manera similar, la



En The Expression of the Emotions in Man and Animals*, libro que publicó en 1872, Charles Darwin subrayaba que, ante determinadas emociones, los mamíferos muestran reacciones parecidas, reflejadas en su cara*

selección natural favorece los genes que minimizan los costes o maximizan los beneficios. Los costes se identifican con la mortalidad o inversión en energía; los beneficios, con fecundidad o réditos energéticos.

Los huesos largos de las extremidades de los mamíferos son tubos rellenos de médula; con ellos resisten fuerzas que tienden a doblarlos. Esos huesos ahuecados son más tenaces a la rotura por doblamiento que las varas sólidas de la misma longitud y peso; por esa misma razón el cuadro de las bicicletas está hecho de tubos. La ligereza constituye otra propiedad deseable para los huesos de las extremidades, porque tienen que acelerar o decelerar en cada paso. Cuanto menor sea la masa de una extremidad, menor el trabajo que se necesita para acelerarla. Unos huesos rellenos de aire son más ligeros que los de médula. Lo vemos en las aves.

Pero, ¿dónde se esconde la resistencia ideal de un hueso? En el factor de seguridad. (En éste se fundan también los opuestos a la sinmorfosis, de la que hablaremos.) ¿Son deseables los factores de seguridad? Las capacidades biológicas sobrantes importarían poco si no costaran nada, pero los recursos de espacio y tiempo son limitados, y el exceso dedicado a un componente siempre se produce a expensas de otro. En general, aunque aquí no siempre, las capacidades de mecanismos que funcionan en serie tienden a tener factores de seguridad similares. Esta expresión, tomada de la ingeniería, designa la razón entre la resistencia buscada de una estructura y la carga máxima que se espera tenga que soportar.

Por unos finos poros que atraviesan las cáscaras de los huevos de las aves se difunden el agua y el oxígeno. ¿Cuál debe ser el diámetro ideal del poro? Si los poros fueran estrechos en demasía, el embrión se sofocaría; si demasiado anchos, se secaría. La demanda de oxígeno es mayor al final de la incubación, cuando el embrión respira más deprisa. Admitamos que la presión parcial del huevo en esa fase, p_o, sea menor que la presión parcial atmosférica. Admitamos que el huevo pierda una fracción a de su masa inicial por evaporación de agua durante la incubación. Grandes valores de p_o o de a serían dañinos para el embrión.

Las aves incuban sus huevos y cuidan de los polluelos. Muchos osteíctios vigilan sus huevos. La atención a los huevos y a los juveniles aumenta sus posibilidades de sobrevivir, pero requiere tiempo y energía que podría haberse empleado en procrear de nuevo. Un macho puede abandonar su pareja en cuanto ha fecundado los huevos y andar en busca de otra hembra. Eso aumentaría su eficacia biológica si la madre primera se cuidara de la descendencia. De modo parecido, una hembra tendría mayor posibilidad de incrementar su eficacia biológica si abandonara al macho, dejado al cuidado de la progenie. El equilibrio de la ventaja biológica en cada progenitor depende del comportamiento del otro; parece, pues, adecuado aplicar aquí la teoría de juegos.

En el marco de la evolución, para cualquier estrategia optimizadora (del hueso, del poro del huevo o del cuidado de la prole) la consideración última reside en la maximización de la eficacia biológica. Esa meta halla su realización en la arquitectura ideal de la especie. Arquitectura ideal significa constitución más económica, es decir, la que satisface el principio de sinmorfosis.

Pero no todos aceptan ese planteamiento, como se pone de relieve en *Principles of Animal Design*, dedicados a Charles Richard Taylor, discípulo de Knut Schmidt-Nielsen y defensor de la fisiología integrada. Desde su enfoque de la fisiología de sistemas, Taylor buscó siempre principios unificadores; así, el principio de sinmorfosis, en cuya virtud no hay más estructura en el animal que la necesaria para cumplir su función.

Esa necesidad presenta una expresión cuantitativa. Los biólogos moleculares miden actividades de enzimas y transportadores; los celulares dan la cifra de canales iónicos de permeación o receptores por micrómetro cuadrado de membrana; los anatomistas pesan masas de órganos; los fisiólogos miden la capacidad de difusión del pulmón. ¿Hasta qué punto estas magnitudes están determinadas por las cargas impuestas sobre ellas? ¿De qué modo los humanos esculpieron en su genoma que el transportador de glucosa constituya un 0,1 porcentaje de nuestra proteína intestinal, mientras que forman el 1 por ciento en los pájaros carpin-

teros o el 0,001 por ciento en las serpientes?

La sinmorfosis combina rendimiento, capacidad y economía. Sea el movimiento animal, del caballo por ejemplo. Vemos cumplido el principio de Taylor en el uso diferente que hacen de sus patas según vayan al paso, al trote o a la carrera. En el diseño de las extremidades se observa un perfecto ajuste entre estructura y exigencia funcional.

Con la aportación de oxígeno y nutrientes a las células, por citar procesos comunes, se satisfacen las demandas reales. Ello se lleva a cabo mediante la variación de la velocidad a la que operan enzimas u órganos. Tales velocidades alcanzan a menudo un límite superior, una velocidad máxima. Si este parámetro se halla prefijado, la capacidad global quedará establecida por el propio diseño estructural. Dicho de otro modo, cualquier ajuste de la capacidad funcional a otras necesidades requerirá procesos morfogenéticos.

No es nueva la consideración ética del trato del hombre con los animales. Pero hoy se ha vuelto obligada y no puede hablarse de zoología sin esa perspectiva en el horizonte. De entre los anaqueles repletos hemos extraído, casi al azar, *Brute Science* y *Taking Animals Seriously*. Al sacrificio reclamado por la investigación biomédica rutinaria podemos agregar su función de huéspedes de virus (uso del mono rhesus como reservorio del virus de la poliomielitis), de biorreactores para producir compuestos activos (bioingeniería) o los experimentos para descubrir los huéspedes naturales de virus muy agresivos, así el de Ebola.

El principal impulso, y su base doctrinal, lo recibió la experimentación de Claude Bernard, padre de la medicina de laboratorio. En líneas generales, sus seguidores defienden el uso de animales en la investigación por los beneficios que reporta. A ese método de trabajo atribuyen los grandes avances médicos del siglo XX, mientras rechazan que pueda sustituirse por planteamientos alternativos de simulación o cultivos celulares, que en el mejor de los casos debieran reputarse complementarios.

Los progresos que se esgrimen van desde los antibióticos hasta la microcirugía cerebral y cirugía de marcapasos, pasando por terapias anticancerosas o la erradicación de enfermedades infecciosas. Sin investigación en animales no habrá vacuna contra el sida, ni se avanzará en el tratamiento de cardiopatías y otros graves problemas sanitarios.

Ponen sordina a ese panorama difícilmente objetable los opuestos a la experimentación animal. Según esa corriente, la medicina ha beneficiado a los humanos, pero su papel en la prolongación de la vida humana y en el control de las enfermedades es mucho menor de lo que se aduce. Las tasas de mortalidad atribuible a la tuberculosis, pneumonía, gripe, escarlatina, sarampión, difteria y fiebre tifoidea habían caído drásticamente antes del advenimiento de las vacunas y tratamiento quimioterapéutico de esas enfermedades. Los verdaderos agentes de la mejora en la calidad sanitaria serían la dieta, las condiciones de vida y la higiene.

Niegan, por ende, la vinculación entre experimentación y desarrollo médico. Hay un sesgo de partida, esgrimen: la ley prescribe que todo nuevo fármaco, todo nuevo ingenio prostético y toda técnica quirúrgica inédita deben ensayarse en animales antes de emplearlos en humanos; en consecuencia, la correlación entre experimentación animal y descubrimiento médico es una exigencia legal, no una prueba de que la experimentación conduce a los adelantos de la medicina. Llegan a sostener que el descubrimiento de la insulina, por citar un hito clave, más que fruto de la experimentación en perros, fue éxito de la investigación clínica.

Sobre esa situación antagónica, aunque asimétrica en verdad, viene reflexionando, con especial aplicación desde hace una treintena de años, la filosofía moral. *Taking Animals Seriously* distingue incluso varias generaciones. La piedra angular de cualquier construcción teórica sobre la legitimidad moral de la experimentación en animales estriba en la respuesta que se dé a las preguntas sobre la existencia o no de sentimientos, emociones, deseos y mente en los animales; y aceptado cualquiera de ellos, sobre su naturaleza. El paso siguiente consistirá en definir el estatuto moral que se derive.

DeGrazia forma la primera generación con Peter Singer, R. G. Frey y Tom Regan. Singer se opone a la experimentación en razón del principio de igualdad. Si un animal, de cualquier especie que sea, sufre, no existe justificación moral para provocarle dolor. Ello le lleva a considerar el *especiesismo* —sesgo en favor de nuestra propia especie— como moralmente odioso, en la misma línea que el sexismo o el racismo. Se le toma por adalid ideológico del movimiento *Animal Liberation*, título de su catecismo.

En *Interests and Right*s Frey niega que los animales tengan intereses, que se fundan en deseos. Nadie puede desear lo que no conoce y todo conocimiento implica lenguaje. Por tanto, si los animales carecen de lenguaje, carecerán de conocimiento y, en consecuencia, de deseos. Y de intereses. Careciendo de intereses, los animales no tienen estatuto moral.

Regan expone en *The Case for Animal Rights* la razón de su alejamiento del utilitarismo, doctrina muy extendida en el mundo anglosajón. Según señala gráficamente, a tenor del utilitarismo la esclavitud es mala sólo porque no maximiza el bien, no porque atente contra la autonomía e inviolabilidad del individuo. Regan concede *valor inherente igual* a todos los individuos. Llama individuo al ser que tiene un bienestar, capaz de operar bien o mal a lo largo del tiempo; y eso dice que se da al menos entre mamíferos. De la noción de valor inherente infiere el principio de respeto, que obliga a no infligir daño a los individuos.

En torno a esas coordenadas sobre el estatuto moral de los animales han venido moviéndose partidarios y contrarios a la experimentación más reciente. DeGrazia, que milita en el movimiento liberador, defiende la autoconsciencia en los animales y despacha la importancia del lenguaje con la distinción entre comunicación y lenguaje articulado. Avala su tesis en los experimentos espectaculares realizados con primates. Como el del grupo al que se le familiarizó con el uso de los espejos. Se les anestesió y se les pintó con colorantes inodoros en zonas de su cabeza que eran visualmente inaccesibles sin un espejo. Tras despertarse recurrieron al espejo para presionar en los puntos pintados. Mostraban, pues, cierta conciencia de la separación entre su cuerpo y la imagen del mismo. Esa autoconsciencia, continúa, se observa más a menudo en el comportamiento social, que obliga a tomar en cuenta las exigencias de otros.

El debate sigue abierto. Persistirá mientras no se acoten con precisión en los animales las condiciones de todo acto moral genuino, es decir, que sea voluntario, libre y responsable, propiedades que remiten a la autonomía del sujeto que realiza la acción.

LUIS ALONSO

George Gerpheide

Puntero táctil

El dispositivo de puntero más corriente en los nuevos ordenadores portátiles es la almohadilla táctil, un rectángulo negro o gris que se sitúa siempre delante del teclado. El desplazamiento de un dedo por encima de él hace que el cursor realice un movimiento análogo sobre la pantalla.

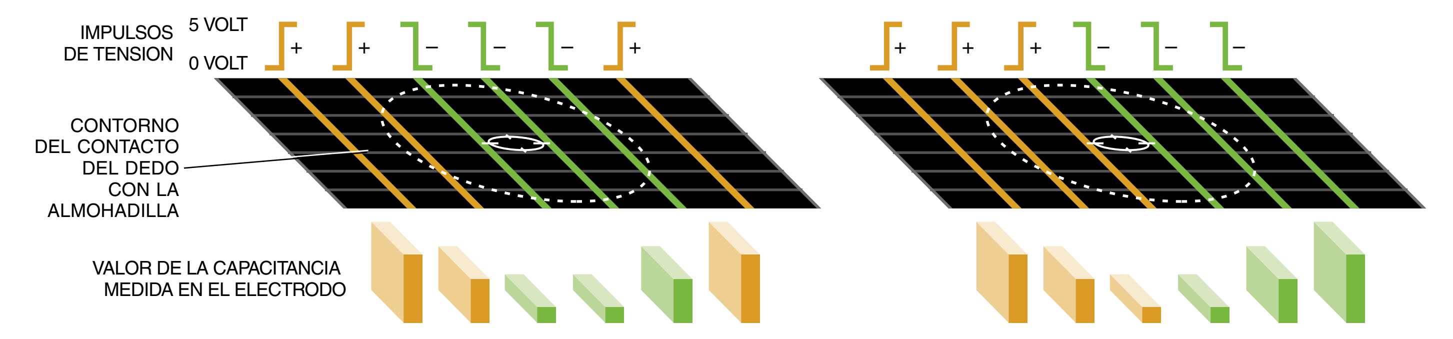
Las almohadillas táctiles iniciaron su andadura no hace más de cuatro años, pero ya han desplazado a los apuntadores de bola integrados como puntero estándar de los ordenadores portátiles, que las ofrecen ahora en más de sus dos tercios. (El resto, en su mayoría modelos de IBM y de Toshiba, emplean el pequeño puntero, similar a un mando de juegos y que recuerda a la goma de borrar de lápiz, instalado en el teclado entre las letras “G”, “H” y “B”.) El manejo de las almohadillas táctiles es mucho más conveniente para muchas personas, entre ellas quienes padezcan de artritis. Como se trata de dispositivos completamente herméticos, en su interior no penetran el polvo ni las sustancias extrañas, lo que los hace más adecuados para ambientes difíciles, tales como talleres, plantas fabriles y garajes.

El tipo de almohadilla táctil más extendido es el de capacitancia, que funciona midiendo sus variaciones cuando el dedo del usuario altera los minúsculos campos eléctricos existentes en la parte superior de la almohadilla.



LOS ELECTRODOS están dispuestos en dos capas, de orientación mutuamente ortogonal, y separados por una lámina delgada de fibra de vidrio, que actúa de aislante, o “dieléctrico”.

UN CAMPO ELECTRICO se establece cuando se aplica un impulso de tensión entre un electrodo superior y otro inferior, lo que tiene como resultado que los dos electrodos, el material dieléctrico interpuesto e incluso el aire circundante funcionen como un condensador. Ese campo eléctrico se modifica ante la presencia de un dedo, distorsión que genera una disminución de la capacitancia entre los electrodos y de la carga eléctrica.

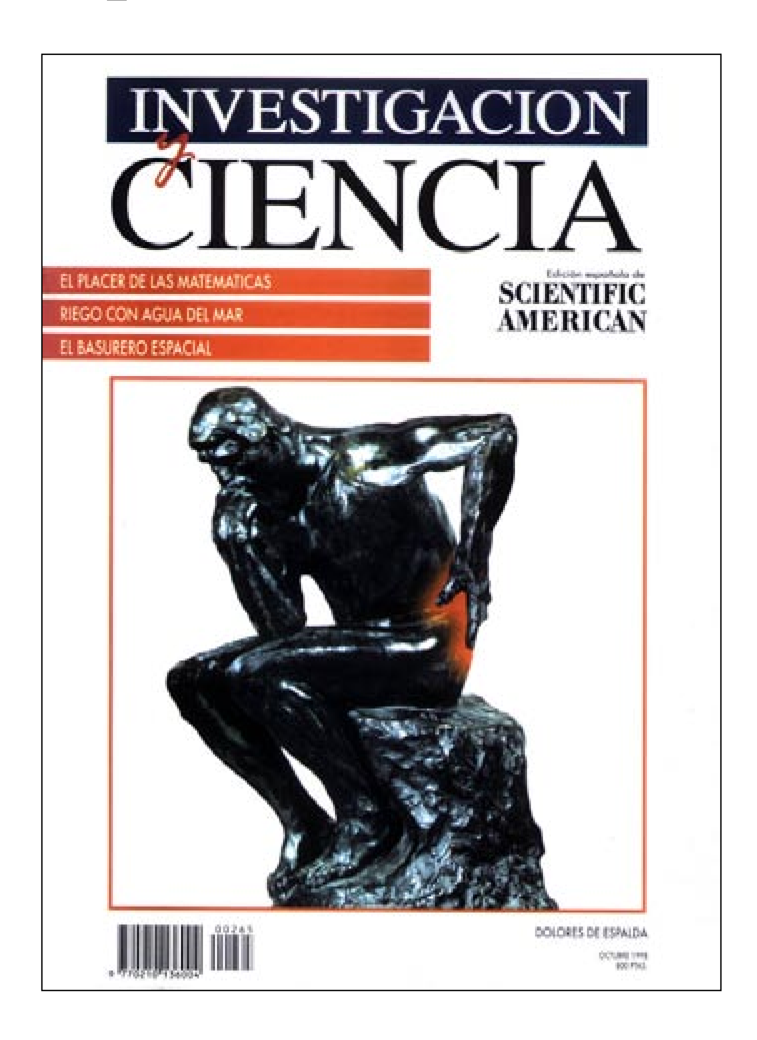


EL DESEQUILIBRIO ENTRE LAS CAPACITANCIAS TOTALES (LA DEL GRUPO NARANJA ES MAYOR QUE LA DEL VERDE) SIGNIFICA QUE EL DEDO CUBRE MAS LOS ELECTRODOS VERDES

EL EQUILIBRIO ENTRE LOS VALORES DE AMBOS GRUPOS INDICA UNA POSICION EQUIDISTANTE DEL DEDO RESPECTO DE LOS ELECTRODOS

LA LOCALIZACION DEL DEDO requiere el desplazamiento de dos grupos de impulsos de tensión. Si se tratase de comprobar la capacitancia en cada uno de los puntos de cruce de los electrodos, se tardaría demasiado tiempo y la reacción del puntero al movimiento del dedo sería perezosa. Por ello lo que se hace es aplicar dos grupos de impulsos, positivos (*en naranja*) y negativos (*en verde; diagramas derecho e izquierdo*) a los electrodos, midiendo la carga resultante de su capacidad. La situación del dedo con relación al límite entre las regiones de impulsos positivos y negativos se determina mediante cálculos realizados con las cargas totales medidas. Ambos grupos de impulsos tienen que desplazarse conforme se mueve el dedo, de forma que su frontera se mantenga cercana al centro del mismo. La ilustración no muestra más que los impulsos correspondientes al conjunto de los electrodos paralelos verticales; lo mismo hay que hacer realmente con el juego de electrodos transversales. Se logra así el seguimiento bidimensional del movimiento del dedo hasta velocidades de unos 100 centímetros por segundo.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



DOLORES DE ESPALDA, por Richard A. Deyo

Los sufren la mayoría de las personas adultas. Debido a sus múltiples y oscuras causas, resulta difícil explicar su aparición. Los tratamientos disponibles van mejorando, sin que se necesite recurrir habitualmente a la cirugía ni al reposo absoluto.

COMPUTOS CON ADN, por Leonard M. Adleman

Pueden resolverse problemas de cálculo mediante la combinación, el crecimiento y la recombinación de trozos de ADN en un tubo de ensayo, como se hace con los electrones que se mueven a través del silicio. Repaso y perspectivas de una técnica novedosa.

RESIDUOS EN EL ESPACIO, por Nicholas L. Johnson

Satélites artificiales exhaustos, trozos de cohete, tuercas y tornillos, esquirlas de pintura y muchos otros desechos peligrosos rodean la Tierra a gran altura. No sólo hay que evitar que el problema siga agravándose, sino que hay que limpiar el basurero.

EL PLACER DE LAS MATEMATICAS, por Martin Gardner

El más famoso representante de las matemáticas recreativas, que las difundió con gran éxito durante un cuarto de siglo desde estas mismas páginas, hace balance de sus esfuerzos e insiste en el valor pedagógico de los juegos matemáticos.

RIEGO CON AGUA DE MAR, por Edward P. Glenn, J. Jed Brown y James W. O'Leary

Los cultivos vegetales corrientes no toleran el agua del mar. Pero las plantas que sí lo hacen pueden servir de pasto y proporcionar alimentos y aceites, por lo que su cultivo tendría gran importancia para las zonas costeras y los desiertos del mundo.

CEPAS MEJORADAS DE *RHIZOBIUM*, por Esperanza Martínez Romero, Rafael Palacios y Jaime Mora

Con el fin alcanzar mayor rendimiento en la fijación biológica del nitrógeno, se investigan las posibilidades de modificación genética de las bacterias involucradas. Los avances en ese campo permiten reducir el uso de abonos químicos.

MICRODIAMANTES, por Rachael Trautman, Brendan J. Griffin y David Scharf

Aunque no sirvan para joyería, tienen muchas aplicaciones industriales, aparte de contribuir a la comprensión de los mecanismos de formación y de crecimiento del diamante natural.

LAS PROMESAS DE LA FUSION NUCLEAR, por Gerold Yonas

Un nuevo aparato que produce pulsos intensos de rayos X en los Laboratorios Sandia, la máquina Z, da nuevo aliento y credibilidad a las siempre incumplidas promesas sobre esta forma de obtención de energía.

UNA EPIDEMIA DE FIEBRE AMARILLA, por Kenneth R. Foster, Mary F. Jenkins y Anna Coxe Toogood

La que se desató en Filadelfia en 1793 estuvo causada por las malas condiciones higiénicas y la ignorancia. Por extraño que parezca, no es imposible su repetición.

